

УДК 629.78

*И.Л. Борисенков, М.И. Калинов, В.А. Родионов*

## **ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ РАДИОЛОКАЦИОННОГО И РАДИОЭЛЕКТРОННОГО МОНИТОРИНГА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

*I.L. Borisenkov, M.I. Kalinov, V.A. Rodionov*

### **DOMESTIC SPACE SYSTEMS OF THE RADAR AND RADIO-ELECTRONIC MONITORING OF THE EARTH'S SURFACE**

Рассмотрены история создания и опыт применения отечественных космических систем радиолокационного и радиоэлектронного мониторинга земной поверхности. Определены основные направления их дальнейшего развития. Представлены оценки периодичности обнаружения объектов мониторинга.

КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ; МОНИТОРИНГ; РАДИОЛОКАТОР; ЗЕМНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ; НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ.

Considered are the history of creation and experience of application of domestic space systems of radar and electronic monitoring of the earth surface. Defines the main directions of their further development. Presents estimates of the detection frequency of monitoring objects.

SPACE SYSTEMS; MONITORING; RADAR; SURFACE; DIRECTION OF DEVELOPMENT.

4 октября 1957 года в нашей стране был успешно выведен на околоземную орбиту первый искусственный спутник Земли. Он положил начало космической эре в развитии человечества. Всего за 1957–2014 годы запущено более трех тысяч космических аппаратов (КА) различного целевого назначения. В настоящее время в околоземном космическом пространстве активно функционируют свыше тысячи КА, а космической деятельностью занимаются более 40 стран. В состав орбитальной группировки Российской Федерации входит свыше 100 космических аппаратов.

В современных условиях решение задач информационного обеспечения данными об обстановке невозможно без применения космических систем (КС) радиолокационного и радиоэлектронного мониторинга (РРМ) земной поверхности (ЗП), которые применяются в глобальном масштабе с высокой оперативностью и требуемой периодичностью для осуществления контроля параметров и состояния объектов мони-

торинга (ОМ) независимо от их действий, погоды и времени суток. При этом под мониторингом подразумевается система (процесс) сбора (регистрации), хранения и анализа небольшого количества признаков (параметров) описания объекта для вынесения суждения о его поведении (состоянии).

В начале 70-х годов прошлого века в нашей стране была создана система морской космической разведки и целеуказания (МКРЦ), предназначенная для добывания информации о надводной обстановке и выдачи ее потребителям в интересах применения сил и средств флота [1]. В состав системы входили космические аппараты (КА) радиолокационной и радиотехнической разведки (рис. 1, 2).

Система МКРЦ эксплуатировалась почти 40 лет, успешно решая задачи мониторинга морской поверхности и обеспечивая данными о надводной обстановке органы управления различных иерархических уровней. За это время КА системы зафиксировали десятки тысяч объектов

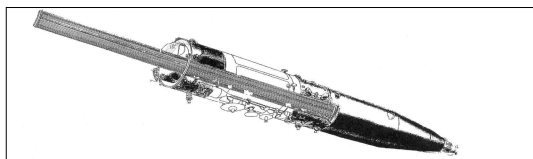


Рис. 1. КА радиолокационной разведки

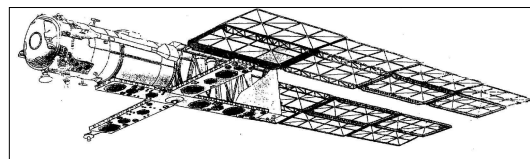


Рис. 2. КА радиотехнической разведки

надводной обстановки, при этом общее количество обнаружений этих объектов превышает несколько миллионов.

С конца 1980-х годов эксплуатация КА радиолокационной разведки (РЛР) была прекращена из-за нескольких нештатных ситуаций с бортовой ядерной энергетической установкой (ЯЭУ), служившей источником электропитания для радиолокационной станции (РЛС) бокового обзора (БО), установленной на КА. В 1990-х годах на околоземной орбите активно функционировало до 4–6 КА радиотехнической разведки (РТР) системы МКРЦ. При этом периодичность обнаружения объектов мониторинга на морской поверхности составляла несколько часов. На завершающей стадии эксплуатации в составе орбитальной группировки системы было не более 1–2 КА. Всего было запущено свыше 80 КА системы МКРЦ.

Параллельно с системой МКРЦ задачи радиотехнического мониторинга земной (в ограниченном объеме — морской) поверхности решались также и КС радиоэлектронного наблюдения (РЭН). С 1968 по 1982 года в нашей стране было запущено более 30 КА обзорных радиотехнических наблюдений (рис. 3).

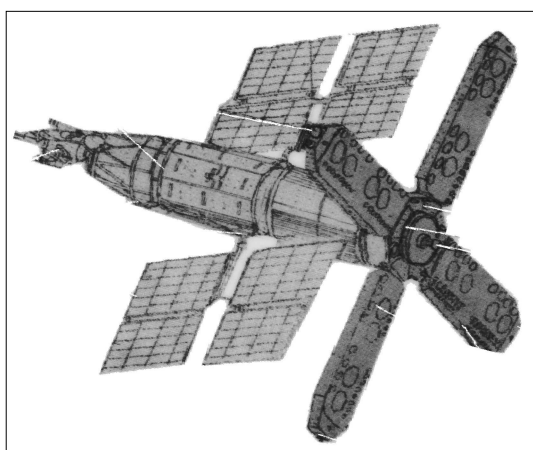


Рис. 3 — КА системы радиоэлектронного наблюдения

Последующие модификации этих КА предназначались уже для детальных радиотехнических измерений с приемом, анализом и высокоточной привязкой к местности источников радиотехнических сигналов. В ходе их испытаний было показано, что получаемая информация позволяет не только обнаружить источники радиоизлучения (ИРИ) и определить их местоположение, но и точно установить их назначение, характеристики и режимы функционирования. С 1970 по 1994 год на орбиту было выведено свыше 70 таких КА [2].

В 1980-х годах была создана новая модификация КА РЭН, оснащенная аппаратурой для наблюдения не только РЛС, но и других источников радиоизлучений, что позволило обеспечить решение задач РЭН в полном объеме. Всего на околоземную орбиту было выведено более 100 КА космической системы РЭН. С 2009 года задачи радиотехнического мониторинга земной поверхности решаются КА нового поколения (рис. 4).

Специфический вид КС радиоэлектронного мониторинга морской поверхности — международная космическая система поиска и спасения судов и летательных аппаратов, терпящих

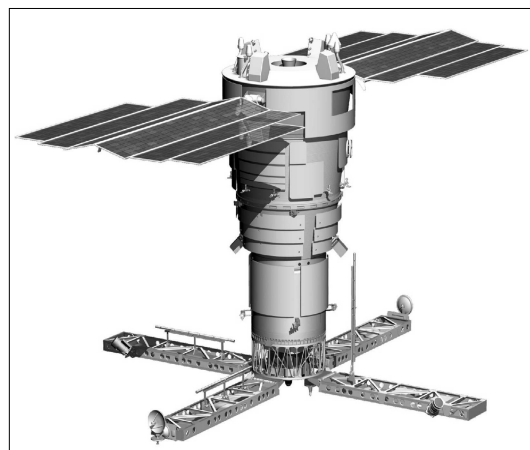


Рис. 4. КА радиотехнического мониторинга нового поколения

бедствие, КОСПАС-САРСАТ [3]. Первый КА этой системы был запущен в нашей стране в 1982 году (рис. 5). Система позволяет обнаруживать терпящие бедствие объекты в любых районах нашей планеты и доставлять информацию об этих объектах силам и средствам спасения. Время устаревания информации при этом не превышает одного часа. Сочетание высокой точности определения координат объекта, терпящего бедствие, и минимально возможного (по сравнению с другими средствами) времени устаревания информации позволяют системе решать поставленные задачи с высокой эффективностью. На счету системы КОСПАС—САРСАТ десятки тысяч спасенных человеческих жизней.

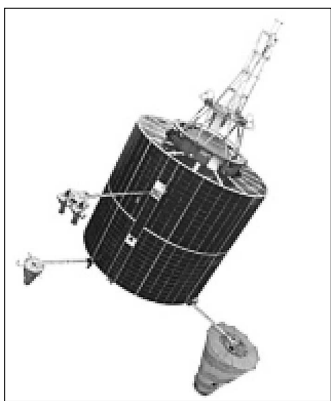


Рис. 5. КА системы КОСПАС—САРСАТ

Помимо космических аппаратов радиолокационной разведки с ЯЭУ, входивших в состав системы МКРЦ, в нашей стране на рубеже 80–90-х годов прошлого века было запущено несколько КА, имевших в качестве бортового локатора РЛС с синтезированием апертуры (РСА) (рис. 6). Синтезирование апертуры позволило бортовой РЛС КА получать высокую разрешающую способность (до единиц—десятков метров) и более достоверно проводить классификацию объектов, обнаруженных на земной

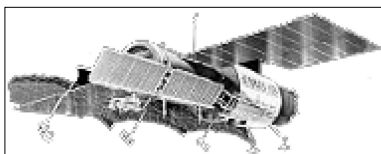


Рис. 6. КА «Алмаз» с РСА

поверхности. Испытания КА прошли успешно, но серийно они не производились и для решения практических задач мониторинга земной поверхности не использовались [4].

Задачи мониторинга поверхности Мирового океана (состояния водной поверхности и ледяного покрова) более 20 лет (1983—2007 гг.) успешно решались советской (российско-украинской) космической системой «Океан», которая, по сути дела, являлась первой в мире оперативной радиолокационной океанографической космической системой (рис. 7). Космические аппараты этой системы функционировали до 2007 года. Всего на орбиту было выведено 8 КА системы «Океан» [5].

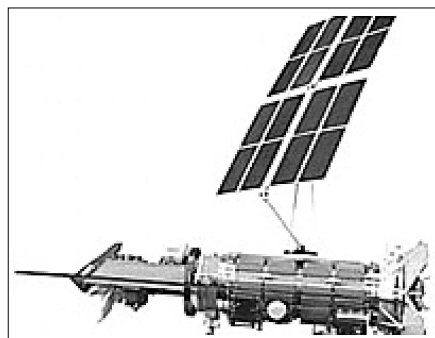


Рис. 7. КА «Океан-О»

В 2009 году был осуществлен запуск КА «Метеор-М», положивший начало воссозданию российской метеорологической орбитальной группировки (рис. 8). Гидрометеорологический космический аппарат «Метеор-М» создан на базе космической платформы типа «Ресурс» и в отличие от ранее существовавших метеорологических КА типа «Метеор» дополнительно имеет в составе бортового специального комплекса (БСК) РЛС БО. Это позволяет ему с разрешением 1–3 км получать радиолокационные изображения морской поверхности, осуществлять мониторинг ледового и снежного покровов, состояния гидрологических объектов, а также суши и растительности [6].

В соответствии с утвержденной в 2006 году Концепцией развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года в нашей стране предусматривается создание космического комплекса (КК) всепогодного радиофизического наблюдения

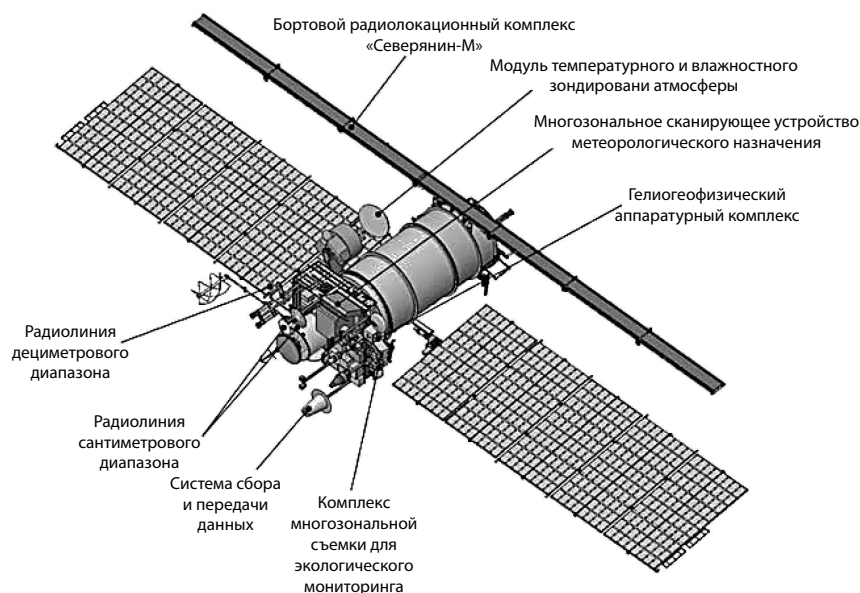


Рис. 8. Гидрометеорологический КА «Метеор-М»

Мирового океана и КК высокоточного радиолокационного наблюдения. Основные идеи Концепции в настоящее время реализуются при создании космических систем «Арктика-Р» и «Кондор» [6, 7].

Комплексное решение задач радиолокационного мониторинга в арктических районах планируется проводить в рамках инновационного проекта «Арктика-Р». Запуск космических аппаратов и начало штатной эксплуатации системы «Арктика-Р» планируется осуществить не позднее 2015 года. Космическая система «Арктика-Р» в составе двух радиолокационных КА и наземных станций приема-передачи данных предназначена для информационного обеспечения хозяйственной деятельности в Арктическом регионе, включая обеспечение разработки месторождений на шельфе, мониторинг ледовой обстановки и чрезвычайных ситуаций, контроль судоходства и хозяйственной инфраструктуры, обновление и создание топографических и тематических карт и др.

Космический аппарат «Арктика-Р» должен с высокой оперативностью обеспечивать детальную, обзорную и маршрутную съемку с разрешением 1–2 м, 3–5 м и до 150 м соответственно. Периодичность получения результатов радиолокационного наблюдения объектов в арктических районах составляет 4–6 часов (рис. 9).

В 2013 году на околоземную орбиту выведен малый космический аппарат «Кондор-Э» с универсальным многорежимным РСА ближнего дециметрового S-диапазона волн для обзора земной поверхности с пространственным разрешением до 1–2 м. Этот КА предназначен для решения широкого круга задач, в том числе задач мониторинга океана и ледовой разведки, экологического мониторинга моря и суши, мониторинга чрезвычайных ситуаций и контроля судоходства (рис. 10).

В целом, в 70–80-е годы прошлого века из общего количества запусков КА до 12–15 % составляли запуски КА, решавших задачи радиолокационного и радиоэлектронного мониторинга земной поверхности. Был получен большой



Рис. 9. КА «Арктика-Р»

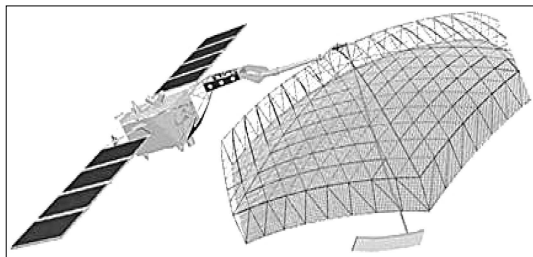


Рис. 10. КА «Кондор-Э»

опыт эксплуатации таких КА. Применение ядерной энергетической установки в качестве источника энергии для КА радиолокационной разведки (РЛР) в системе МКРЦ до сих пор не имеет аналогов в мире. Высокая оперативность доведения информации до потребителей обеспечивалась реализацией на борту КА режима передачи данных об обстановке в реальном масштабе времени. Сочетание разнородных источников данных (активная и пассивная радиолокация) в одной системе (МКРЦ) позволяло существенно повысить достоверность добываемой информации. Дополнительным фактором, повышающим вероятность правильной классификации обнаруженных объектов, был информационный обмен между различными космическими системами. Большой объем различных народно-хозяйственных задач решался на основе данных, получаемых от КА океанографической космической системы «Океан». При создании и эксплуатации космических систем КОСПАС—САРСАТ и «Океан» накоплен определенный опыт международного сотрудничества.

Вместе с тем опыт эксплуатации космических систем радиолокационного и радиоэлектронного мониторинга земной поверхности выявил и ряд существенных недостатков:

зачастую проявлялся «эффект неоднозначности» местоопределения источника радиоизлучения, связанный с особенностями применения фазового метода его пеленгации на земной поверхности;

кратковременный энергетический контакт низкоорбитальных КА РТР с ИРИ (нахождение КА в зоне радиовидимости ИРИ не превышало нескольких минут) не позволял зафиксировать достаточно большую выборку радиотехнических параметров ИРИ, необходимую для его достоверной классификации;

низкая (единицы км) разрешающая способность РЛС, устанавливаемых на КА, не позволяла производить правильную классификацию обнаруженных объектов мониторинга с высокой вероятностью при отсутствии априорных данных об этих объектах или большом времени их устаревания;

большое количество «мешающих объектов», фиксируемых БСК КА, (мощные береговые РЛС, малые острова, гидрометеообразования и т.п.) затрудняли процесс обработки полученных данных о морских объектах;

для получения приемлемых значений периодичности обнаружения объектов наблюдения в низких широтах (десять минут — единицы часов) требовалось иметь в составе орбитальной группировки не менее 6—12 низкоорбитальных КА.

Большой практический интерес представляет исследование информационных свойств КС, важнейшим из которых является периодичность обнаружения объектов мониторинга. Для выполнения подобных исследований удобно применять имитационно-моделирующий комплекс информационных космических систем, программное обеспечение которого поддерживается в актуальном состоянии в Санкт-Петербургском отделении секции прикладных проблем при Президиуме РАН.

Для определения периодичности (временных интервалов между обнаружениями объекта мониторинга) целесообразно воспользоваться статистическим подходом, основанным на моделировании процесса функционирования космической системы.

При моделировании процесса функционирования КС с КА на низких орбитах можно построить график, на котором отображается соответствующим символом обнаружение или необнаружение каждого из  $n$  объектов, имитирующих неопределенность положения ОМ, при пролете КА над заданным районом. После чего производится измерение интервалов между обнаружениями и, в конечном итоге, определяется периодичность обнаружения ОМ, которая отображается в форме гистограммы — статистической плотности распределения временных интервалов между обнаружениями с заданной дискретностью (рис. 11).

На основании этой гистограммы строится интегральный закон распределения, используемый

впоследствии для получения искомых оценок — значений интервалов времени между последовательными обнаружениями ОМ с вероятностью не ниже заданной (рис. 12). В верхней части рис. 12 для удобства приведены цифровые данные для статистической плотности  $f$  и закона распределения  $F$  по каждому из разрядов, на которые разделен интервал оценки.

Моделирование процесса функционирования КС производится с учетом множества факторов, имеющих случайный характер (местоположение ОМ в заданном районе, фиксация ОМ, его распознавание на пункте приема информации и т. п.).

В таблице представлен пример оценки периодичности обнаружения объектов мониторинга КА с шириной полосы обзора 1500–2000 км в районах Северо-Восточной Атлантики (СВА) и Средиземное море (СРМ) [8].

Нетрудно заметить, что даже при сравнительно большой ширине полосы обзора КА приемлемые интервалы времени (единицы часов) между обнаружениями ОМ могут быть получены только в высоких широтах, а в средних широтах — при большой (не менее 6 КА) орбитальной группировке КС РРМ ЗП.

Представленный пример наглядно свидетельствует, что для достижения высокой эффективности решения задач информационного обеспечения морской деятельности необходимо иметь достаточно большую (не менее 6 КА) орбитальную группировку космической системы радиолокационного мониторинга морской поверхности.

Обобщение имеющихся публикаций, отчетственный и зарубежный опыт эксплуатации космических систем радиолокационного и радиоэлектронного мониторинга земной поверхности позволяют определить основные тенденции их развития:

Итервал времени между обнаружениями объектов

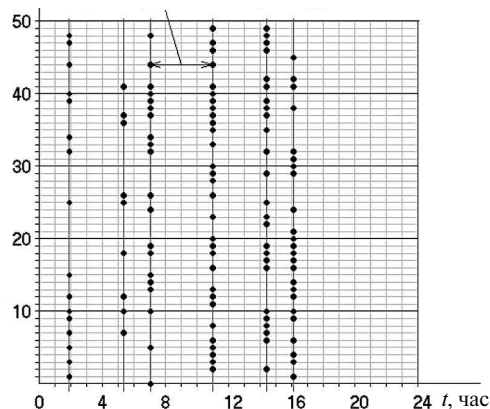


Рис. 11. К определению временных интервалов между обнаружениями объектов, имитирующих неопределенность положения ОМ

расширение диапазона высот КА, решающих задачи РРМ ЗП, путем установки дополнительной аппаратуры радиоэлектронного мониторинга на среднеорбитных, высокоэллиптических КА и КА на геостационарной орбите;

организационно-техническое и информационное объединение разнотипных и разновысотных КА космических систем РРМ ЗП в единую многоярусную орбитальную группировку, решающую задачи в интересах всех потребителей информации о надводной обстановке;

создание КА радиолокационного мониторинга с БСК, автоматически адаптирующимся к обстановке путем соответствующего изменения ширины полосы обзора и разрешающей способности бортового локатора;

разработка КА с многоканальным БСК (многоспектрального оптико-электронного, радиоэлектронного и радиолокационного мониторинга), способным адаптироваться к обстановке и функционировать в условиях искусственных и естественных помех;

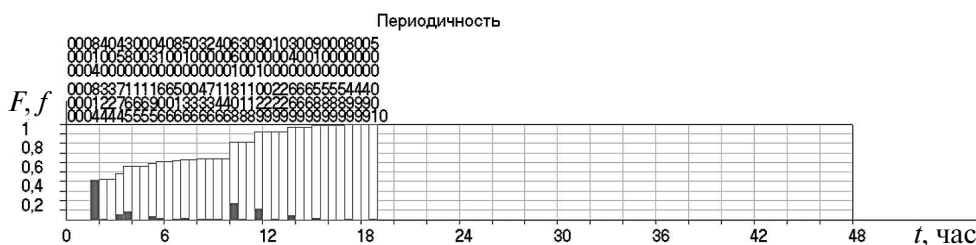


Рис. 12. Построение закона распределения временных интервалов между обнаружениями объектов в КС РРМ ЗП (вариант)

**Значения интервалов времени между обнаружениями объектов мониторинга с вероятностью не ниже 0,8 при применении космической системы РЛМ МП (вариант)**

Район	Количество КА	Интервалы времени, час
СВА	1	19,0
СВА	3	3,5
СВА	6	2,0
СРМ	1	47,0
СРМ	3	15,5
СРМ	6	4,0

совершенствование методов мониторинга (применение многопозиционного зондирования, применение расширенных режимов работы (широкозахватные с высоким разрешением, скошенного обзора, многолучевые с селекцией движущихся целей, с применением межвитковой интерферометрии для повышения разрешения поперек трассы полета), совместное применение угломерного, разностно-временного и разностно-доплеровского методов пеленга-

ции, взаимный обмен между КА априорными и оперативными данными об обстановке и т.д.); совместное применение КА оптико-электронного наблюдения и КА с РСА;

совершенствование системы планирования применения КА (оптимальное распределение ресурса БСК, рациональное сочетание обзорных и детальных режимов, внедрение элементов искусственного интеллекта для адаптации режимов работы БСК к текущей фоно-целевой обстановке в заданном районе мониторинга);

разработка и применение нового поколения КА радиолокационного мониторинга с бортовой ЯЭУ на радиационно неопасных орбитах (высота полета КА не менее 1000–1500 км).

Для дальнейшего развития космических систем, решающих задачи радиолокационного и радиоэлектронного мониторинга земной поверхности в нашей стране, потребуется осуществить большой комплекс организационно-технических и кадровых мероприятий, а также значительно активизировать работы, длительное время ведущиеся в этом направлении, при их безусловном и достаточном финансировании.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Землянов А.Б., Коссов Г.Л., Траубе В.А.** Система морской космической разведки и целеуказания. СПб.: ЗАО «Геоид», 2002. 214 с.
2. **Железняков А.Б.** Спутники радиотехнической разведки «Целина»: история создания и эксплуатации // Тр. Общероссийской научно-технической конференции «Третьи Уткинские чтения». СПб.: Изд-во БГТУ, 2007. Т.2 С. 81–83.
3. **Балашов А.И., Зурабов Ю.Г., Пчеляков Л.С., Рогальский В.И., Шебшаевич В.С.** Международная космическая радиотехническая система обнаружения терпящих бедствие. М.: Радио и связь, 1987. 326 с.
4. **Гарбук С.В., Гершензон В.Е.** Космические системы дистанционного зондирования Земли. М.: Изд-во А и Б, 1997. 296 с.
5. **Пустовойтенко В.В., Терехин Ю.В.** [и др.]. Этапы и результаты развития технологии дистанционного зондирования морских акваторий (к 30-летию от-

ечественной спутниковой океанологии) // Тр. 17-й Междун. Крымск. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (CriMiCo 2007)». Севастополь: Вебер, 2007. С.15–25.

6. Официальный сайт Федерального космического агентства. <http://www.federspace.ru>.

7. **Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э.** Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010. 682 с.

8. **Завилевич Д.Н., Калинов М.И., Родионов В.А., Торгашов А.А.** Исследование периодичности обнаружения объектов наблюдения при совместном применении космических систем наблюдения с космическими аппаратами на средних и низких орбитах // Актуальные проблемы защиты и безопасности. Труды 16-й Всероссийской научно-практической конференции. СПб.: Изд-во НПО Спецматериалов, 2013. Том 4. С. 316–321.

### REFERENCES

1. **Zemlyanov A.B., Kossov G.L., Traube V.A.** Sistema morskoy kosmicheskoy razvedki i tseleukazaniya. SPb.: ZAO «Geoid», 2002. 214 s. (rus)
2. **Zheleznyakov A.B.** Sputniki radiotekhnicheskoy razvedki «Tselina»: istoriya sozdaniya i ekspluatatsii *Tr:*

*Obshcherossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Treti Utkinskiye chteniya»* SPb.: Izd-vo BGTU, 2007. T. 2. S. 81–83. (rus)

3. **Balashov A.I., Zurabov Yu.G., Pchelyakov L.S., Rogalskiy V.I., Shebshayevich V.S.** Mezhdunarodnaya

kosmicheskaya radiotekhnicheskaya sistema obnaruzheniya terpyashchikh bedstviye. M.: Radio i svyaz, 1987. 326 s. (rus)

4. **Garbuk S.V., Gershenzon V.Ye.** Kosmicheskiye sistemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli. M.: Izdatelstvo A i B, 1997. 296 s. (rus)

5. **Pustovoytenko V.V., Terekhin Yu.V. [i dr.]**. Etapy i rezultaty razvitiya tekhnologii distantsionnogo zondirovaniya morskikh akvatoriy (k 30-letiyu otechestvennoy sputnikovoy okeanologii) *Tr. 17-y Mezhdun. Krymsk. konf. «SVCh-tekhnika i telekommunikatsionnyye tekhnologii (CriMiCo 2007)»*. Sevastopol: Veber, 2007. S. 15–25. (rus)

6. Ofitsialnyy sayt Federalnogo kosmicheskogo agentstva. <http://www.federspace.ru>.

7. **Verba V.S., Neronskiy L.B., Osipov I.G., Turuk V.E.** Radiolokatsionnyye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya. M.: Radiotekhnika, 2010. 682 s. (rus)

8. **Zavilevich D.N., Kalinov M.I., Rodionov V.A., Torgashov A.A.** Issledovaniye periodichnosti obnaruzheniya obyektov nablyudeniya pri sovmestnom primenenii kosmicheskikh sistem nablyudeniya s kosmicheskimi apparatami na srednikh i nizkikh orbitakh. *Aktualnyye problemy zashchity i bezopasnosti. Trudy 16-y Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. SPb.: Izd-vo NPO Spetsmaterialov, 2013. Tom 4. S. 316–321.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**БОРИСЕНКОВ Игорь Леонидович** — кандидат технических наук заместитель председателя секции Российской академии наук. 119333, г. Москва, ул. Губкина, 3. E-mail: borisenkov46@yandex.ru

**КАЛИНОВ Михаил Иванович** — доктор технических наук ведущий научный сотрудник Российской академии наук. 119333, г. Москва, ул. Губкина, 3. E-mail: cesavo@mail.ru

**РОДИОНОВ Владислав Александрович** — доктор технических наук начальник отделения Российской академии наук. 119333, г. Москва, ул. Губкина, 3. E-mail: var1959@mail.ru

#### AUTHORS

**BORISENKOV Igor L.** — *Russian Academy of Sciences*. Ul. Gubkina, 3, Moskva, Russia, 119333. E-mail: borisenkov46@yandex.ru

**KALINOV Mikhail I.** — *Russian Academy of Sciences*. Ul. Gubkina, 3, Moskva, Russia, 119333. E-mail: cesavo@mail.ru

**RODIONOV Vladislav A.** — *Russian Academy of Sciences*. Ul. Gubkina, 3, Moskva, Russia, 119333. E-mail: var1959@mail.ru