

УДК 621.396

## Результаты моделирования глобальной зоны покрытия среднеорбитального сегмента системы КОСПАС–САРСАТ

**Д. В. Антонов**, аспирант, *dmitry.vl.antonov@gmail.com*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**А. А. Романов**, д. т. н., *Romanov\_AIAI@risde.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** В статье приводятся результаты математического моделирования зоны обслуживания среднеорбитального сегмента КОСПАС–САРСАТ на планируемую дату объявления полной эксплуатационной готовности — 2020 г. Показано, что глобальность зоны покрытия среднеорбитального сегмента на планируемую дату с помощью автономных станций не может быть достигнута из-за наличия в системе медленно подвижных аварийных радиобуев. Продемонстрировано, что объединение наземных станций одной национальной администрации в одну станцию с географически распределенными антеннами, а также специализированная процедура формирования расписания являются потенциальным решением проблемы достижения глобальности зоны обслуживания среднеорбитального сегмента КОСПАС–САРСАТ. На примере планируемого российского 12-антенной СПОИ-СО (6 антенн в г. Москве и 6 антенн на Дальнем Востоке) продемонстрировано, что возможна оптимизация зоны покрытия. При этом за счет уменьшения покрытия в Западной Европе (где уже находится достаточное количество других СПОИ-СО) увеличивается покрытие в Дальневосточном и Тихоокеанском регионах, где ожидаются проблемы с покрытием СССРС. Потенциально оптимизация расписаний СПОИ-СО и смещение их зон обслуживания в области недостаточного покрытия СССРС может помочь достичь глобального обслуживания СССРС.

**Ключевые слова:** КОСПАС–САРСАТ, СССРС, СПОИ-СО, глобальность, зона обслуживания

## Simulation Results of the Global Coverage Area of the Medium Earth Orbit Segment of the COSPAS–SARSAT System

**D. V. Antonov**, postgraduate student, *dmitry.vl.antonov@gmail.com*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

**A. A. Romanov**, Dr. Sci. (Engineering), *Romanov\_AIAI@risde.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The results of the mathematical simulation of the coverage area of the MEOSAR of the COSPAS–SARSAT system for the planned date of the full operation capability (FOC) are presented (FOC is expected to begin in 2020) in this article. It is shown that the globality of the coverage area of the MEOSAR segment for the planned data by means of the standalone stations cannot be achieved because of the slow moving distress beacons in the system. The paper demonstrates that the integration of the ground stations of one National Administration into one station with the geographically distributed antennas, as well as a specialized procedure of schedule planning, are a potential solution to the problem of achieving the globality of the coverage area of the MEOSAR segment of COSPAS–SARSAT program. Based on the example of the planned Russian MEOLUT with 12 antennas (6 antennas in Moscow and 6 antennas in the Russian Far East), the article shows that it is possible to optimize the coverage area, which increases the coverage in the Russian Far East and in the Pacific Region (that might have problems with the MEOSAR coverage) owing to the decrease in the coverage area in Western Europe (where there is a sufficient number of other MEOLUTs). Potentially, the optimization of the MEOLUTs schedules and a shift of their coverage areas in the zones of the insufficient MEOSAR coverage can help to achieve the global service of MEOSAR.

**Keywords:** COSPAS–SARSAT, MEOSAR, MEOLUT, globality, coverage area

## Введение

Одна из ключевых характеристик системы поиска и спасания — глобальность предоставления услуги. Поскольку в последнее время осуществляются работы по внедрению нового сегмента программы КОСПАС–САРСАТ, то наиболее приоритетной на этапе развертывания среднеорбитальной спутниковой системы поиска и спасания (СССПС) является задача обеспечения глобальной зоны обслуживания вновь вводимого сегмента.

На 55-й закрытой сессии Совета КОСПАС–САРСАТ было принято решение об организации экспертной группы, состоящей из специалистов Канады, Франции, России и США, задача которой — оценка зоны обслуживания СССПС и подготовка предложений для достижения глобальности на период до 2020 г., когда планируется объявить статус полной эксплуатационной готовности СССПС [1].

Работа группы главным образом была посвящена оценке зоны обслуживания СССПС на основе космического и наземного сегментов, которые предполагаются быть внедренными к 2020 г., а также экспериментально полученных точностей измерения времен прихода сигналов АРБ на спутники-ретрансляторы (ТОА) и их частот (ФОА) в предположении о том, что все аварийные радиобуи (АРБ) неподвижны (т.е. скорость АРБ равна нулю и доплеровский сдвиг частоты возникает только из-за наличия скорости спутника). Однако, как было показано в работах [2, 3], около половины всех АРБ являются медленно движущимися (их скорость не превышает 5 м/с), что вызывает дополнительный доплеровский сдвиг частоты, и для определения их координат с заданной точностью требуется больше измерений, чем в случае полностью неподвижных АРБ. Чаще всего АРБ имеют собственную скорость движения, находясь на водной поверхности, под действием течений или ветра.

В [4] показано, что зона обслуживания станции приема и обработки информации среднеорбитального (СПОИ-СО) сегмента КОСПАС–САРСАТ при работе с подвижными АРБ значительно меньше, чем при работе с неподвижными. Таким образом, моделирование зоны обслуживания СССПС

в предположении о том, что все АРБ — неподвижны, является слишком оптимистическим, в силу чего требуется проведение моделирования, оценивающего зону обслуживания с учетом наличия скорости у АРБ.

Кроме того, в перспективе необходимо учитывать неравномерность размещения СПОИ-СО на поверхности Земли в различных географических регионах. Процент глобальности зоны обслуживания СССПС может быть повышен при условии учета региональных ресурсов наземного сегмента и скоординированного использования спутниковых ретрансляторов.

## Моделирование зоны обслуживания СССПС в предположении, что все АРБ являются неподвижными

Оценка глобальности СССПС производится на основе методики оценки зоны обслуживания отдельного СПОИ-СО, описанной в [4]. Космический сегмент состоит из 25 КА S-диапазона (GPS) и 31 КА L-диапазона (ГЛОНАСС и Galileo). Сначала для каждой СПОИ-СО составляется описание слежения за спутниками-ретрансляторами и находится ее зона обслуживания. Зона обслуживания СССПС получается путем простого объединения зон обслуживания отдельных СПОИ-СО.

В качестве первого шага было проведено моделирование в предположении, что все АРБ являются неподвижными (как на море, так и на суше). Графические результаты моделирования показаны на рис. 1. Синими маркерами обозначен 12-антенная географически распределенная СПОИ-СО Европейского Союза (на каждой отдельной станции находятся 4 антенны). Красными маркерами отмечены автономные СПОИ-СО, число на них отображает количество антенн. Из представленного рисунка видно, в предположении о наличии только неподвижных АРБ, в 2020 г. покрытие СССПС будет глобальным со значительной степенью дублирования.

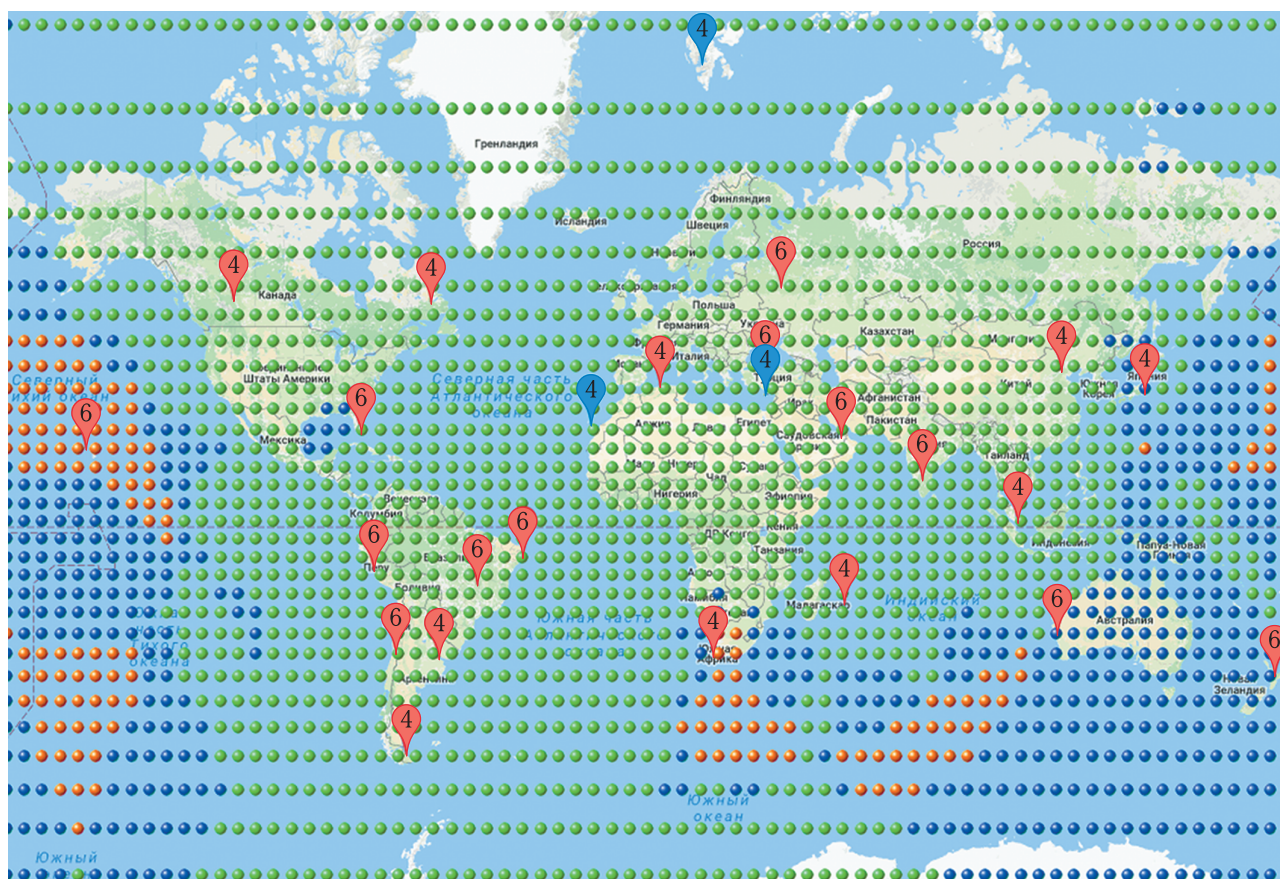


Рис. 1. Покрывание ГССПС в предположении неподвижных АРБ.  
Количество СПОИ-СО, покрывающих точку: ● 3, ● 2, ● 1

## Моделирование зоны обслуживания ГССПС в предположении, что все АРБ являются медленно подвижными

Как говорилось выше, предположение о неподвижности АРБ, к сожалению, — существенное упрощение реальной ситуации, поскольку практически любой АРБ, сработавший в акватории мирового океана и находящийся в дрейфе, неподвижным считаться уже не может. Кроме того, необходимо учитывать перспективные персональные радиобуи, которые могут вместе с людьми перемещаться не только в воде, но и по суше. С учетом этих фактов было проведено моделирование зоны обслуживания ГССПС, в котором все АРБ считались уже малоподвижными (как на суше, так и на море).

Как было показано в [4], 4-антенная СПОИ-СО не способна выполнять точностные требования ГССПС при работе по медленно подвижным АРБ, поэтому моделировалась работа только 6-антенных СПОИ-СО и 12-антенной географически распределенной СПОИ-СО Европейского Союза. На рис. 2 показан результат проведенного моделирования (доля глобальности составила 50,2 %).

Сделав предположение о дооснащении всех существующих сегодня 4-антенных СПОИ-СО до 6-антенных, провели еще одно моделирование, результат которого показан на рис. 3 (процент глобальности составил 71,3 %).

Таким образом, видно, что рассмотрение медленно подвижных АРБ кардинально меняет картину глобальности, которая может быть достигнута к 2020 г. с учетом прогнозируемых космического и наземного сегментов. В случае использования 6-антенных СПОИ-СО и 12-антенной СПОИ-СО

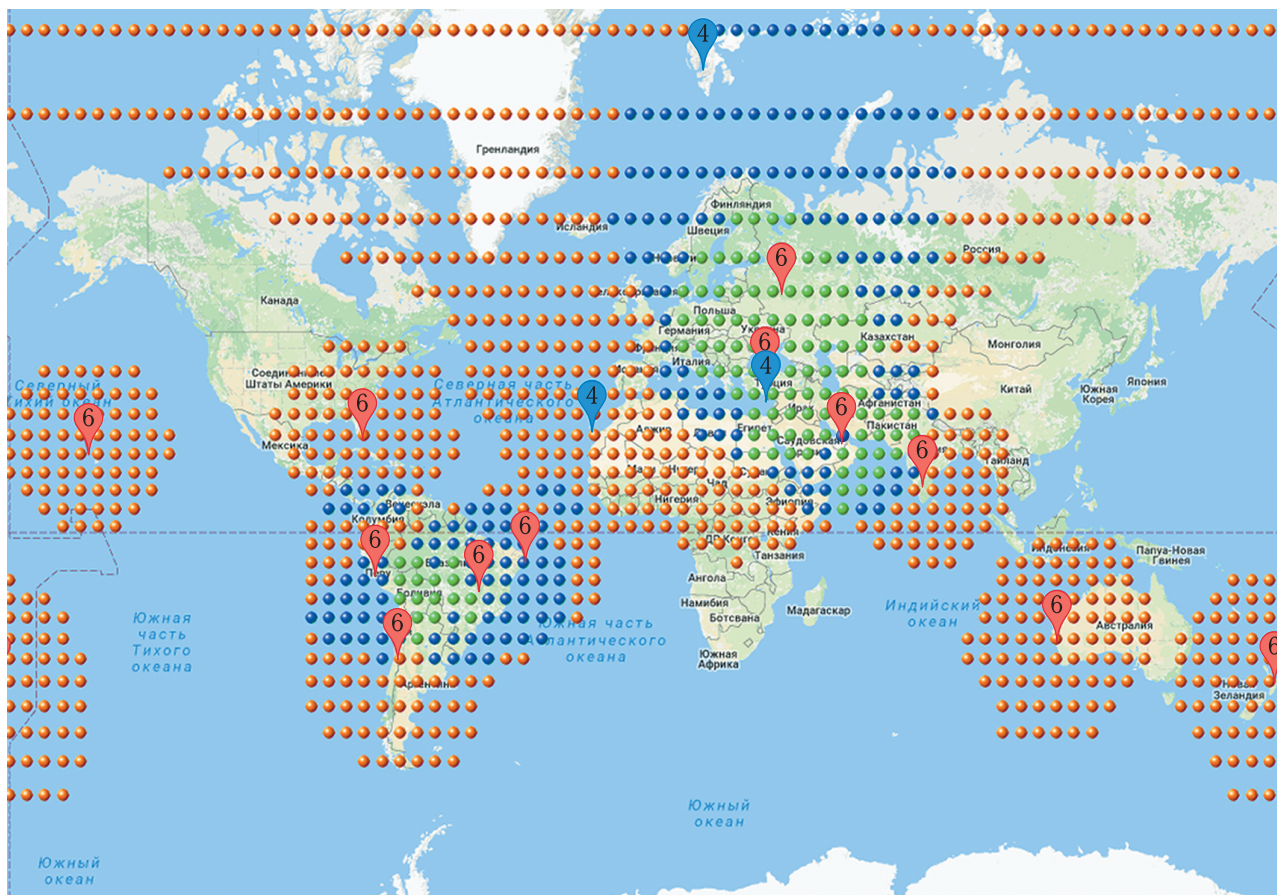


Рис. 2. Покрытие СССПС в предположении медленно подвижных АРБ.  
Количество СПОИ-СО, покрывающих точку: ● 3, ● 2, ● 1

ЕС процент глобальности покрытия не превысит 52 %. Если предположить, что все ныне существующие станции будут модернизированы до 6 антенн, процент глобальности составит порядка 70 %.

Таким образом, к 2020 г. при условии наличия 56 спутников-ретрансляторов и существующего парка даже 6-антенных СПОИ-СО СССПС не обеспечит глобальности предоставления услуги поиска и спасания.

### Увеличение зоны обслуживания при совместном использовании антенн несколькими СПОИ-СО и координировании их расписаний

Как было показано выше, планируемый на 2020 г. наземный сегмент не способен обеспечить глобальное покрытие Земли в предположе-

нии наличия подвижных АРБ. Необходимо найти решение, позволяющее увеличить зону покрытия, поскольку принципиальным преимуществом СССПС над другими сегментами системы КОСПАС–САРСАТ должна быть именно глобальность обслуживания в режиме реального времени.

Для увеличения зоны обслуживания предлагается использовать обмен измерениями между СПОИ-СО и взаимно координировать их расписания. Это особенно актуально для национальных администраций, располагающих более чем одной СПОИ-СО.

В рамках моделирования зоны покрытия перспективного российского наземного сегмента, в котором планируются 7-антенная СПОИ-СО в Москве и 7-антенная СПОИ-СО на Дальнем Востоке (6 антенн считаются рабочими и 1 — запасной) были рассмотрены два сценария — в предположении автономной работы каждого

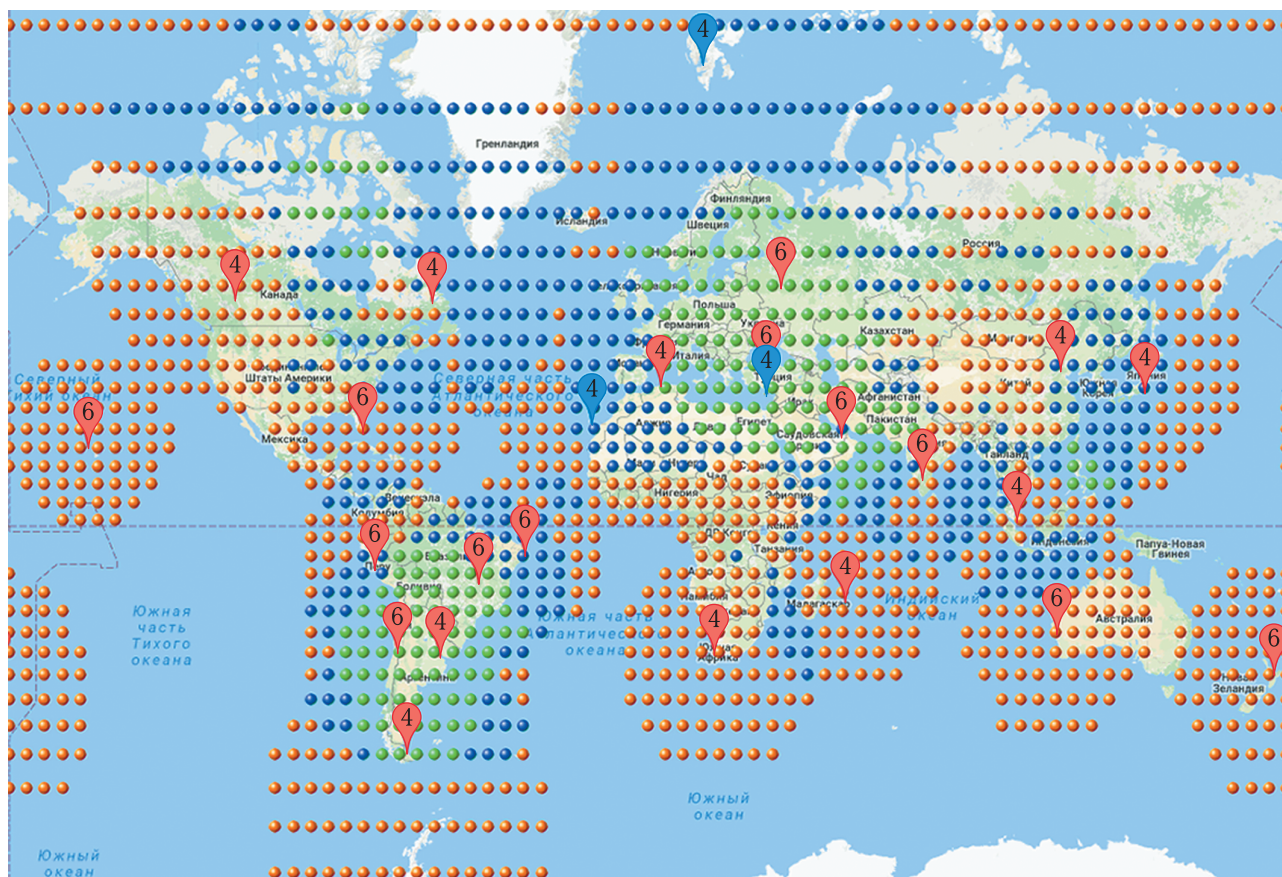


Рис. 3. Покрытие СССПС в предположении, что все СПОИ-СО имеют 6 антенн.  
Количество СПОИ-СО, покрывающих точку: ● 3, ● 2, ● 1

из СПОИ-СО, а также при их совместной работе с обменом измерениями и координированным расписанием.

В случае автономной работы использовался алгоритм планирования, описанный в [4], а в случае координированной работы для каждой СПОИ-СО выбирались космические аппараты с наибольшим углом места относительно СПОИ-СО. При этом ни один из КА не планировался одновременно на обе СПОИ-СО и в каждый момент времени в план попадали 12 разных КА. Среднеквадратичное отклонение (СКО) измерений времен прихода сигнала АРБ на КА было заложено номинальным согласно [5] и составило 25 мкс. Номинальное СКО измерений частот составляет 0,20 Гц, однако для российских СПОИ-СО, использующих способ, описанный в [6], этот показатель составляет 0,08 Гц. Поскольку измерения частот вносят главный вклад в точность измерения координат АРБ [2], точность

определения координат на российских СПОИ-СО выше, чем на всех остальных СПОИ-СО [7].

На рис. 4 и рис. 5 представлены получившиеся результаты. Как видно, зона обслуживания увеличилась более чем в два раза (с 10,7 % до 24,4 % поверхности Земли), при этом для 12-антенной СПОИ-СО в большинстве случаев точность составила не хуже 2 км в 95 % случаев, что с запасом удовлетворяет требованиям КОСПАС-САРСАТ (5 км в 95 % случаев).

Кроме того, такая 12-антенная СПОИ-СО с географически распределенными антеннами обладает достаточной гибкостью при объявлении зоны обслуживания. Так как в Европе уже имеется большое количество СПОИ-СО и покрытие там представляется достаточно надежным, а в дальневосточном регионе, напротив, имеются значительные затруднения с обеспечением требуемого качества обслуживания СССПС, то целесообразно

**Результаты моделирования глобальной зоны покрытия  
среднеорбитального сегмента системы КОСПАС–САРСАТ**

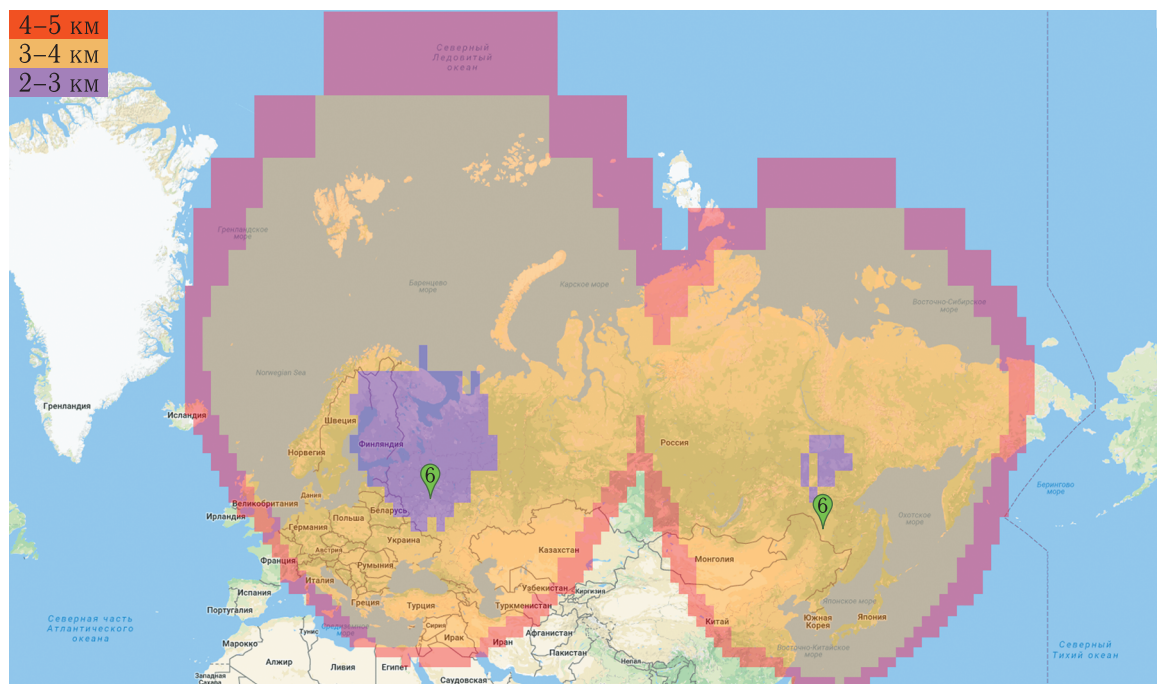


Рис. 4. Оценка зоны покрытия двух автономных СПОИ-СО России (10,7 % от поверхности Земли)

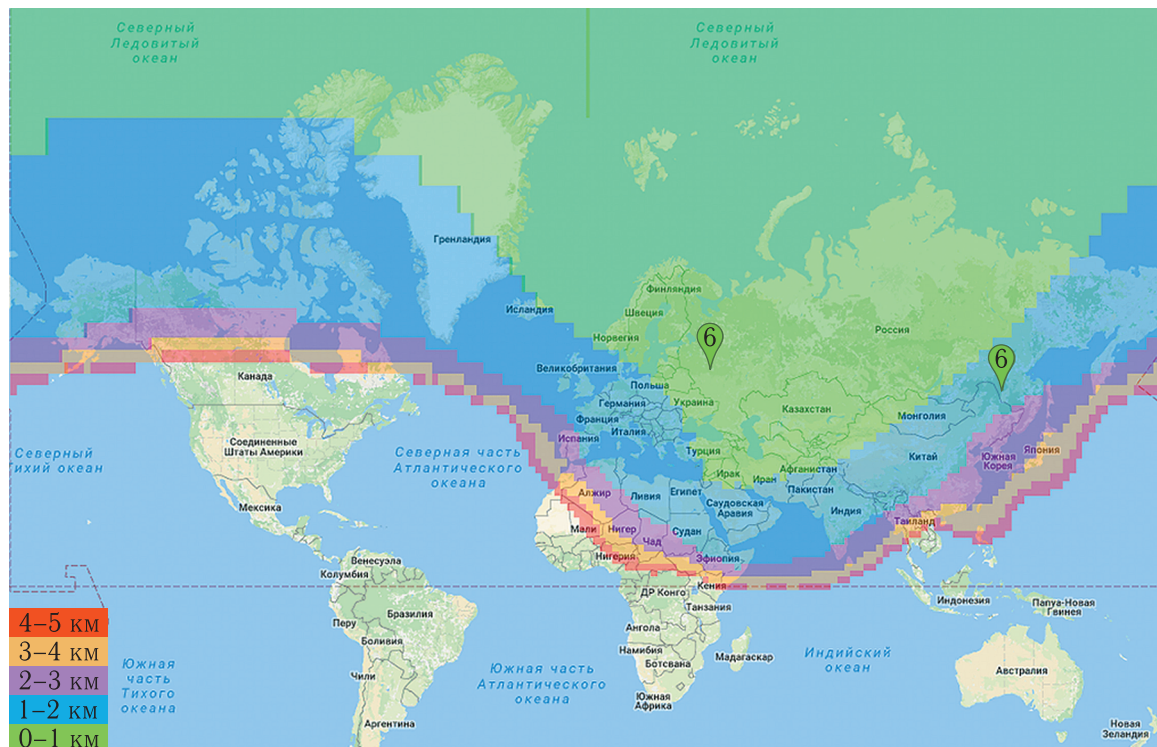


Рис. 5. Оценка зоны покрытия для СПОИ-СО России с 12 географически распределенными антеннами

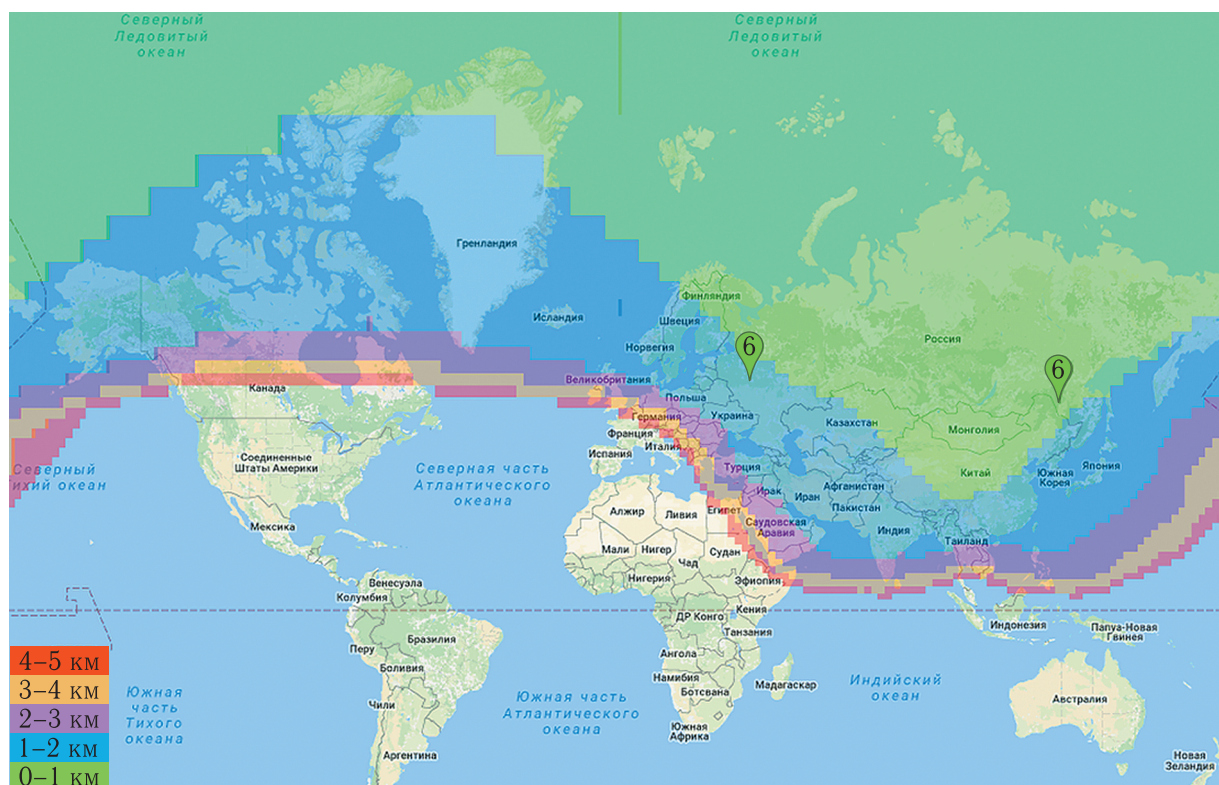


Рис. 6. Оценка зоны покрытия для СПОИ-СО России с 12 географически распределенными антеннами и приоритетом восточных спутников при планировании (24,4 % от поверхности Земли)

было бы сместить зону обслуживания российско-го наземного сегмента на восток.

Рис. 6 демонстрирует результаты моделирования, в котором был несколько изменен алгоритм планирования 12-антенной СПОИ-СО. Это изменение заключается в том, что при выборе спутников-ретрансляторов для наведения на них антенн СПОИ-СО предпочтение отдавалась КА, имеющим в своей зоне радиовидимости воды Тихого океана, прилегающие к берегам России. Результатом этого изменения стало увеличение зоны покрытия Дальнего Востока и вод Тихого океана за счет уменьшения зоны покрытия в Западной Европе и Северной Африке.

На данный момент более чем одной СПОИ-СО, помимо России, располагают или планируют располагать несколько национальных администраций: Бразилии, Канады, США, Аргентины, Европейского Союза (ЕС). Таким образом, идея использования общих антенн нескольких СПОИ-СО применима для этих национальных администраций. На рис. 7–8 представлены результаты

моделирования для некоторых таких потенциально возможных станций. Точность измерения частот в этих сценариях моделирования была заложена номинальной (0,20 Гц).

Сделав некоторые предположения о том, какие СПОИ-СО могут работать совместно и скоординированно, была проведена оценка процента глобальности с использованием таких многоантенных (8–12 антенн) СПОИ-СО. Наземный сегмент был представлен следующими станциями:

- 12-антенная (6+6) СПОИ-СО России (желтый цвет);
- 12-антенная (6 + 6) СПОИ-СО Канады (оранжевый цвет);
- 12-антенная (6 + 6) СПОИ-СО США (синий цвет);
- 12-антенная (6+6) СПОИ-СО Бразилии (красный цвет);
- 16-антенная (4 + 4 + 4 + 4) СПОИ-СО ЕС (зеленый цвет);

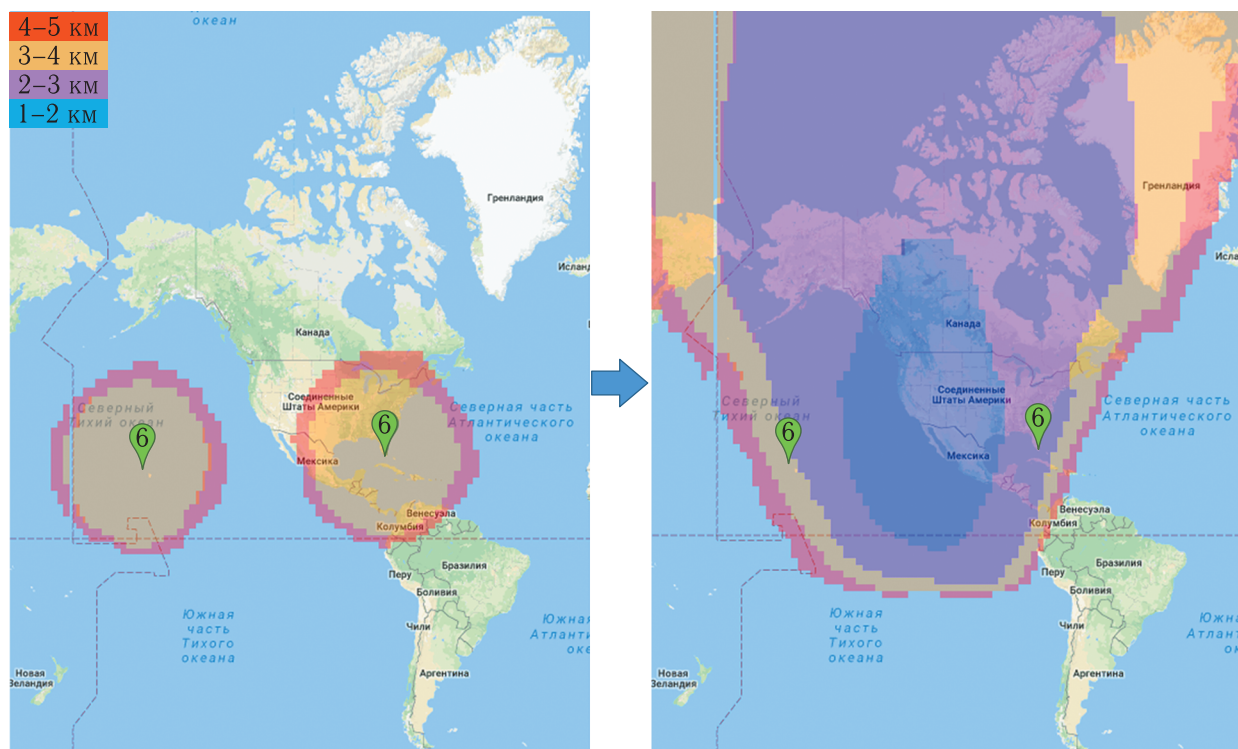


Рис. 7. США (Гавайи и Флорида). Оценка зоны покрытия двух СПОИ-СО в автономном режиме (слева, 10,2% от поверхности Земли) и с 12 общими антеннами (справа, 20,0% от поверхности Земли)

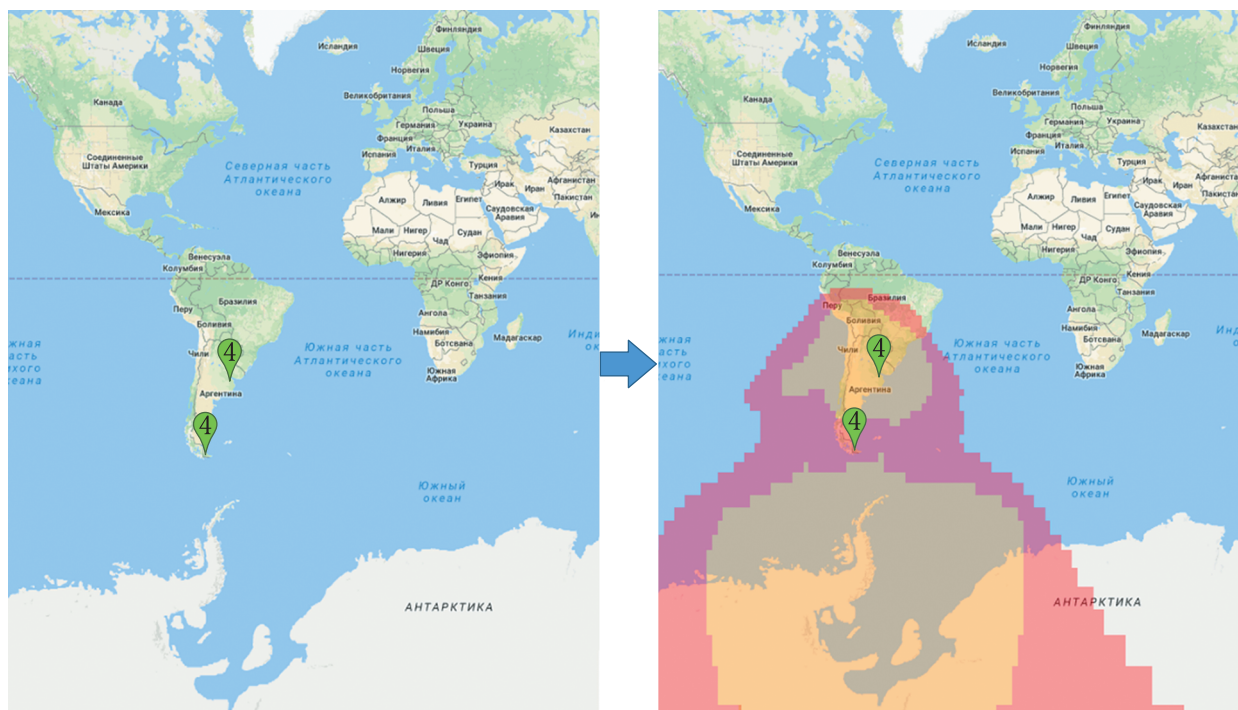


Рис. 8. Аргентина. Оценка зоны обслуживания двух автономных СПОИ-СО (слева, 0% от поверхности Земли) и с 8 общими антеннами (справа, 9,4% от поверхности Земли)

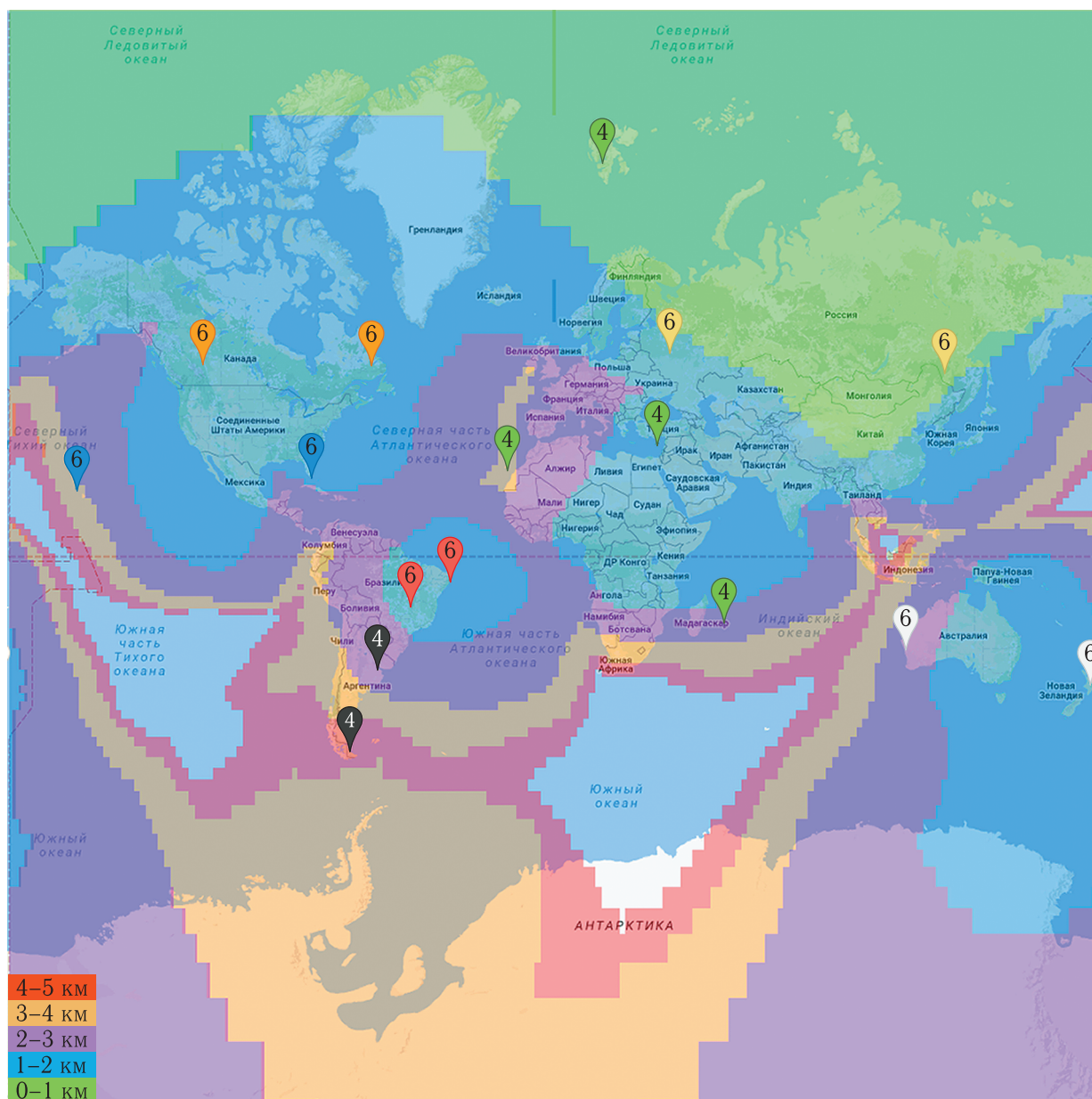


Рис. 9. Оценка глобальности при моделировании «больших» СПОИ-СО (92,4 % от поверхности Земли)

- 8-антенная (4 + 4) СПОИ-СО Аргентины (черный цвет);
- 12-антенная (6 + 6) СПОИ-СО Австралии и Новой Зеландии (белый цвет).

Результаты этого моделирования показаны на рис. 9.

В этом случае процент глобальности составил 92,4 %, причем существует значительный потенциал для покрытия проблемных регионов путем опти-

мизации расписаний, как это было продемонстрировано в случае с 12-антенной СПОИ-СО России. Кроме того, не были учтены некоторые автономные СПОИ-СО, которые также могут помочь в некоторых регионах (СПОИ-СО Чили и Перу в юго-восточной части Тихого океана, ЮАР, при условии установки дополнительных антенн — в южных частях Индийского и Атлантического океанов). Однако дальнейшие моделирования целесообразно проводить позже, после того, как будет

доступно больше информации о планах национальных администраций, обладающих наземными станциями СПОИ-СО.

## Выводы

В статье рассмотрены результаты моделирования зоны обслуживания СССПС в предположениях о том, что все АРБ являются неподвижными либо медленно подвижными АРБ.

В предположении о том, что все АРБ являются неподвижными, моделирование подтверждает 100 %-ю глобальную зону покрытия СССПС со значительным дублированием.

Однако предположение о неподвижности АРБ с учетом наличия морских, персональных, а также перспективных авиационных АРБ — существенное упрощение ситуации и в качестве основного в текущих реалиях развития системы использовано быть не может.

Моделирование зоны покрытия СССПС в предположении о существовании медленно подвижных АРБ на суше и на море показало, что процент глобальности значительно уменьшился по сравнению с моделированием в предположении о том, что все АРБ являются неподвижными, и составил только 52 %. Следовательно, глобальность СССПС не может быть достигнута с помощью автономных СПОИ-СО.

Был предложен алгоритм использования СПОИ-СО, позволяющий существенно расширить глобальность зоны обслуживания СССПС. Моделирование зоны обслуживания, проведенное для перспективного наземного сегмента Российской Федерации, показало, что с учетом обмена измерениями и взаимного координирования расписаний на станциях можно повысить процент глобальности зоны обслуживания с 10,7 % до 24,4 %.

Кроме того, необходимо учитывать неравномерность расположения СПОИ-СО в географических регионах на поверхности Земли. Проведенное моделирование показывает, что с учетом существенного запаса по покрытию в европейском регионе зона обслуживания наземного сегмента Российской Федерации в интересах повышения глобальности покрытия может быть смещена в область Дальнего Востока и Тихого океана.

Аналогичное моделирование было проведено и в глобальном масштабе, было показано, что при определенных условиях можно реализовать 92 %-ю зону обслуживания. Кроме того, при условии совместного использования ресурсов мировых СПОИ-СО процент глобальности зоны обслуживания может быть доведен и до 100 % к 2020 г.

## Список литературы

1. Canada/France/Russia/USA. Experts working group MEOSAR for global coverage. URL: [http://cospas-sarsat.int/images/cospas\\_sarsat/pdf\\_uploads/153/CSC-57-OPN-Inf-19.pdf](http://cospas-sarsat.int/images/cospas_sarsat/pdf_uploads/153/CSC-57-OPN-Inf-19.pdf), дата обращения 07.04.2017.
2. Антонов Д.В., Архангельский В.А., Белоглазова Н.Ю. Точность определения координат аварийных радиобуев по измерениям частот и времен прихода сигналов этих буев на космические аппараты среднеорбитального сегмента системы КОСПАС–САРСАТ // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2016, т. 10, № 1. С. 62–67.
3. Антонов Д.В. Экспериментальная оценка точности определения координат медленно подвижных радиобуев в среднеорбитальном сегменте КОСПАС–САРСАТ // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2017, т. 4, вып. 3. С. 40–45.
4. Антонов Д.В. Оценка зоны обслуживания станции приема и обработки информации среднеорбитального сегмента КОСПАС–САРСАТ // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2017, т. 4, вып. 3. С. 24–34.
5. COSPAS–SARSAT MEOLUT performance specification and design guidelines // C/S T.019, December 2015, Is.1.
6. Архангельский В.А., Селезнев В.В. Пути повышения точности независимого от ГНСС определения местоположения аварийных радиобуев в среднеорбитальном сегменте КОСПАС–САРСАТ // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2017, т. 4, вып. 3. С. 77–86.
7. Антонов Д.В., Федосеев А.В. Экспериментальные исследования точности определения координат аварийных радиобуев в среднеорбитальном сегменте КОСПАС–САРСАТ // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2016, т. 10, № 11. С. 22–27.

## References

1. *Canada/France/Russia/USA. Experts working group MEOSAR for global coverage*. Available at: [http://cospas-sarsat.int/images/cospas\\_sarsat/pdf\\_uploads/153/CSC-57-OPN-Inf-19.pdf](http://cospas-sarsat.int/images/cospas_sarsat/pdf_uploads/153/CSC-57-OPN-Inf-19.pdf) (accessed 7 April 2017).
2. Antonov D. V., Arkhangel'skiy V. A., Beloglazova N. Yu. Tochnost' opredeleniya koordinat avariynykh radiobuev po izmereniyam chastot i vremen prikhoda signalov etikh buev na kosmicheskie apparaty sredneorbital'nogo segmenta sistemy KOSPAS-SARSAT [The accuracy of independent location of a distress radiobeacon derived from the measurements of time and frequency of arrival at the COSPAS-SARSAT medium earth orbiting satellites]. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport* [T-Comm — Telecommunications and Transport]. 2016, Vol. 10, No. 1, pp. 62–67. (in Russian)
3. Antonov D. V. Eksperimental'naya otsenka tochnosti opredeleniya koordinat medlenno podvizhnykh radiobuev v sredneorbital'nom segmente KOSPAS-SARSAT [Experimental Evaluation of the Slow Moving Beacon Location Accuracy in the Middle Earth Orbit Segment of the COSPAS-SARSAT System]. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy* [Rocket-Space Device Engineering and Information Systems]. 2017, Vol. 4, No. 3, pp. 40–45. (in Russian)
4. Antonov D. V. Otsenka zony obsluzhivaniya stantsii priema i obrabotki informatsii sredneorbital'nogo segmenta KOSPAS-SARSAT [Estimation of the Service Area of the Medium Earth Orbit Local User Terminal of the COSPAS-SARSAT System]. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy* [Rocket-Space Device Engineering and Information Systems]. 2017, Vol. 4, No. 3, pp. 24–34. (in Russian)
5. *COSPAS-SARSAT MEOLUT performance specification and design guidelines*. C/S T.019, Issue 1, December 2015.
6. Arkhangel'skiy V. A., Seleznev V. V. Puti povysheniya tochnosti nezavisimogo ot GNSS opredeleniya mestopolozheniya avariynykh radiobuev v sredneorbital'nom segmente KOSPAS-SARSAT [Approaches to Accuracy Improvement of GNSS Independent Determination of Position Data of Emergency Radio Beacons in the Medium Earth Orbit Segment of the COSPAS-SARSAT System]. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy* [Rocket-Space Device Engineering and Information Systems]. 2017, Vol. 4, No. 3, pp. 77–86. (in Russian)
7. Antonov D. V., Fedoseev A. V. Eksperimental'nye issledovaniya tochnosti opredeleniya koordinat avariynykh radiobuev v sredneorbital'nom segmente KOSPAS-SARSAT [The accuracy of independent location of a distress radiobeacon derived from the measurements of time and frequency of arrival at the COSPAS-SARSAT medium earth orbiting satellites]. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport* [T-Comm — Telecommunications and Transport]. 2016, Vol. 10, No. 11, pp. 22–27. (in Russian)