

УДК 621.372

## ВЛИЯНИЕ НА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ И ТОЧНОСТЬ АБОНЕНТСКИХ ПРИЕМНИКОВ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАТОРОВ БЛИЗКОРАСПОЛОЖЕННЫХ ЭКРАНОВ С УЧЕТОМ УСЛОВИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН НА РЕАЛЬНОЙ МЕСТНОСТИ

А.С. АБУКРАА<sup>1</sup>, М.А. ВИЛЬКОЦКИЙ<sup>2</sup>, Л.М. ЛЫНЬКОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный педагогический университет им. М. Танка, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 4 апреля 2017

**Аннотация.** Дана оценка помехоустойчивости абонентских приемников спутниковых навигаторов (АПГСН) в условиях воздействия помех когерентного, шумоподобного и частотного модулированного сигнала. Оценен уровень помехоустойчивости в условиях свободного пространства, а также реальной среды распространения между источником помех и АПГСН. Основные исследования проводились посредством моделирования электромагнитной обстановки с учетом реального положения абонентских приемников и источника помех (ИП) на местности. Проведен анализ размера зон нарушения функционирования в зависимости от мощности ИП и среды распространения. Приводятся характеристики источников помех, геометрия зон нарушения функционирования АПГСН при различных соотношениях высот АПГСН и ИП, а также расположения АПГСН относительно экранов нескольких типов.

**Ключевые слова:** спутниковая навигация, радиопомеха, подавитель навигационных сигналов, экраны электромагнитного излучения.

**Abstract** The estimation of noise immunity of subscriber receivers of satellite navigators (APGSN) under conditions of interference of a coherent, noise-like and FM modulated signal is given. The level of noise immunity in conditions of free space, as well as the real propagation medium between the source of interference and APGSN is estimated. The main studies were carried out by modeling the electromagnetic environment, taking into account the actual position of the subscriber receivers and the source of interference (IP) in the terrain. The analysis of the disturbance zones size was carried out depending on the power of the IP and the propagation medium. The characteristics of interference sources, the geometry of the disturbance zones of APGSN operation at various altitude ratios of APGSN and IP, as well as the location of APGSN relatively to screens of several types are given.

**Keywords:** satellite navigation, radio interference, suppressor of navigation signals, electromagnetic radiation shields.

**Doklady BGUIR. 2017, Vol. 105, No. 3, pp. 85–92**

**Influence of the screens with regular conditions on the immunity and accuracy of subscriber receivers of satellite navigators according to the conditions of radiowaves distribution on the real location**

**A.S. Abukraa, M.A. Vilkotsky, L.M. Lynkov**

### Введение

Уязвимость АПГСН при воздействии непреднамеренных и преднамеренных помех является общепризнанным фактом. Данная уязвимость в равной мере относится как к GPS, так и к ГЛОНАСС и Галилео, так как принципы их построения и используемые диапазоны частот близки. Сейчас радионавигационное сообщество обсуждает проблему уязвимости АПГСН и

поиска запасных систем. Исходя из этого, необходимо проанализировать источники непреднамеренных помех, способы постановки преднамеренных помех аппаратуре потребителей АПГСН и повышение надежности координатно-временного обеспечения в условиях воздействия помех.

Из обзора литературы были сделаны следующие выводы:

- восприимчивыми к помехам являются радиоканалы GPS (частоты L1 и L2), радиоканалы ГЛОНАСС (частоты L1 и L2), радиоканал SBAS (частота L1 GPS), радиоканал передачи корректирующей информации GBAS (диапазон частот 108–117,975 МГц), радиоканал передачи корректирующей информации морских DGNS (диапазон 283–325 кГц);

- опасными помехами являются синусоидальные и шумоподобные сигналы.

Существуют данные, что штатное функционирование СРНС при таких помехах сохраняется, если их интенсивность на 10–12 дБ не превышает минимально допустимый уровень сигнала (–160 дБВт).

Причины нарушения штатного функционирования СРНС из-за воздействия помех:

- 1) непредусмотренные штатным режимом функционирования фазовых детекторов и корреляторов;

- 2) перегрузка входных усилителей;

- 3) возникновение большого числа интермодуляционных продуктов.

Меры по защите от помех определяются возможностями аппаратуры, местной географической обстановкой, тактикой противодействия помехам. Одним из главных этапов в борьбе с воздействием помех является распознавание помех и определение местоположения постановщика.

Основные направления повышения помехоустойчивости для СНА подвижных объектов [1–9]:

- регулирование всего спектра частот на международной основе;

- проведение дополнительных работ по обеспечению электромагнитной совместимости;

- использование внешних или внутренних обнаружителей помех;

- создание схем подавления помех таких как: фильтры, алгоритмы обработки, развязки, специальные экраны;

- применение алгоритмов сглаживания кодовых измерений с использованием дополнительных измерений фазы несущей;

- использование методов сужения полосы пропускания следящих трактов приемников и динамического диапазона приемника.

### Обоснование выбора объектов и методов исследования

В АПГСН передающие антенны для навигационных радиосигналов на НКА имеют круговую поляризацию с правой тройкой вращения. Значения коэффициента направленности  $G(\varphi)$  спутниковых передающих антенн в рабочем секторе направлений  $\varphi$  спутниковой антенны относительно направления на центр Земли представлены в табл. 1 [9].

Таблица 1. Значения коэффициента направленности  $G(\varphi)$  спутниковых передающих антенн

| $\varphi$ , угл.град.        | 0° | 15° | 19° |
|------------------------------|----|-----|-----|
| $G(\varphi)$ , дБ (1600 МГц) | 10 | 12  | 8   |
| $G(\varphi)$ , дБ (1250 МГц) | 9  | 11  | 9   |

Разность дальностей  $R$  от приемной антенны, размещенной на поверхности Земли, до околоразенитного ( $\beta = 90^\circ$ ) НКА до пригоризонтного ( $\beta = 5^\circ$ ) НКА составит  $R = 1200–1300$  км. Из этого следует, что мощность сигнала для пригоризонтных спутников будет значительно ослаблена по отношению к зенитным, примерно 1,58 раза.

Существует оценка бюджета мощности  $P_0$  узкополосных навигационных радиосигналов на выходе ненаправленной приемной антенны (табл. 2).

Таблица 2. Результаты оценки бюджета мощности  $P_0$  узкополосных навигационных радиосигналов на выходе ненаправленной приемной антенны

|                           | 1600 МГц |        | 1250 МГц |        |
|---------------------------|----------|--------|----------|--------|
| $\beta$ , угл.град.       | 90°      | 5°     | 90°      | 5°     |
| $P_n$ , дБ Вт             | +15±1    |        | +9±1     |        |
| $G(\varphi)$ , дБ         | +10      | +12    | +9       | +11    |
| $(\lambda/4\pi R)^2$ , дБ | -182     | -154   | -180     | -182   |
| $G_0(\beta)$ , дБ         | 0        |        | 0        |        |
| $P_0$ , дБ                | -157±1   | -157±1 | -162±1   | -162±1 |

Анализ отношения сигнал/шум при различных видах помех, при котором отсутствует решение навигационной задачи, приведен в табл. 3 дБ [9]. Уровень включает шумы естественного происхождения. Существует небольшое число достаточно обоснованных оценок поражающего соотношения при различных видах помех. Между тем, имеются сведения о широком применении искусственных источников помех в диапазонах АП АПГСН.

Таблица 3. Значения отношения сигнал/шум при различных видах помехи, при котором отсутствует решение навигационной задачи

| Виды помехи            | Режим работы АП | Тип АП СРНС |         |        |        |         |
|------------------------|-----------------|-------------|---------|--------|--------|---------|
|                        |                 | БРИЗ-КМ-И   | МРК-32К | МРК-33 | FAG-50 | МРК-32Р |
| Гармоническая          | слежение        | -58         | -57     | -60    | -57    | -58     |
|                        | захват          | -43         | -41     | -45    | -36    | -46     |
| Шумовая широкополосная | слежение        | -47         | -49     | -46    | -44    | -48     |
|                        | захват          | -41         | -42     | -45    | -43    | -48     |

Основная направленность использования преднамеренных помех в настоящее время связана со злоумышленными действиями преступного и коммерческого характера. Военные применения носят более глобальный характер. Основные методы борьбы с особенностями военного применения известны, но анализ их не входит в рамки данного исследования. К числу преднамеренных следует отнести радиопротиводействие и радиодезинформацию. Организация дезинформации сложна и в данном случае не рассматривается. Радиопротиводействие – это радиоизлучение сигналов достаточной мощности и с характеристиками, которые позволяют мешать приемникам АПГСН отслеживать спутниковые сигналы. При этом могут использоваться следующие типы помех:

- 1) некогерентный синусоидальный сигнал;
- 2) синусоидальный сигнал с изменяющейся частотой;
- 3) импульсы с синусоидальным заполнением;
- 4) узкополосный шум;
- 5) полосовой шум;
- 6) импульсный шум.

Существуют постановщики помех АПГСН самых разных размеров, различной выходной мощности и различной стоимости. Небольшие легкие недолговечные постановщики помех мощностью от 1 до 100 Вт могут стоить менее 1000 долларов и быть изготовлены из коммерчески доступных компонентов людьми, имеющими минимально необходимые знания [10].

В данном случае рассмотрим поражающие факторы источников активных помех малой мощности, которые могут быть доступны к использованию без значительных затрат, в том числе для бытового потребителя. Такие источники преднамеренных помех можно разделить на три основные группы по типу излучаемого сигнала:

- 1) когерентный гармонический сигнал;
- 2) шумоподобный сигнал, имитирующий кодовую последовательность навигационного сигнала;
- 3) частотно-модулированный сигнал со спектром перекрывающим спектр сигнала АПГСН.

Теоретически мощность навигационного радиосигнала, принимаемого наземным потребителем с помощью виртуальной изотропной антенны, одинакова для околоразнонаправленного и пригоризонтного НКА. При использовании реальной антенны в пригоризонтных направлениях она на 3–4 дБ меньше, поскольку у основного типа антенн навигаторов в касательных к поверхности Земли направлениях уменьшается как суммарная принятая мощность, так и

коэффициент эллиптичности. Поэтому в качестве приемной антенны целесообразно рассмотреть как изотропную приемную антенну с круговой поляризацией  $G_0(\beta) = 1$ , так и реальную антенну с диаграммой, полученной в результате математического моделирования. Следует отметить, что экспериментальное определение диаграмм направленности слабонаправленных антенн затруднено и поэтому при расчете экспериментальных оценках использовались расчетные характеристики антенн АП, полученные теоретическими методами.

В данном случае диаграмма направленности реальной антенны АП определялась расчетным путем. При экспериментах экраны располагались параллельно поверхности земли и плоскости навигатора. При этом использовалось большое число типов экранов, на поверхности которых располагался навигатор. Как было показано [10], наличие экранов, параллельных поверхности земли, существенно сказывается на уровне сигналов, принимаемых с пригоризонтных направлений, однако они также могут значительно изменять уровень зенитных сигналов вследствие эффекта зеркальных отражений от местных предметов.

Реальные условия предполагают учет эффектов, вызванных неоднородностью излучения. Необходимо исследование реального рельефа местности, наличие искусственных сооружений. Подобным задачам уделялось большое внимание при разработке рекомендаций МСЭ при планировании систем сухопутной подвижной, фиксированной связи, а также космической связи и вещания. В данном случае существенным аспектом является проведение расчетов в соответствии с апробированными моделями распространения радиоволн применительно к условиям работы АПГСН и их статистической обработке, позволяющей с определенной степенью вероятности прогнозировать их надежную работу. В соответствии с вышеизложенным, объектом исследований выбраны реальные АПГСН и имеющиеся на рынке источники помех. Расчеты проводились с учетом моделей распространения радиоволн согласно различным рекомендациям МСЭ, учитывающих местные условия.

В данном случае на основании изложенных выше допустимых соотношений сигнал/шум, нарушающих функционирование АПГСН, определялись зоны, из которых возможна постановка помех, нарушающих функционирование АП, которые в дальнейшем сопоставлялись с результатами эксперимента.

Исследования проводились с тремя видами преднамеренных источников помех:

- 1) когерентным, несинхронизированным с часами системы АПГСН;
- 2) шумоподобным фазоманипулированным;
- 3) частотно модулированным.

### **Результаты исследований и их обсуждение**

Пример экспериментов воздействия простого синусоидального сигнала – помехи с нерегулируемой мощностью на спутниковый навигационный приемник.

Данные испытания проводились в Минском районе в следующих условиях:

- мощность передатчика подавителя сигналов составляла 1 Вт;
- высота подвеса передающей антенны глушителя от 1,5 до 50 м;
- высота подвеса приемной навигационной антенны 1,5 м.

В экспериментах были задействованы различные АП интегрированные в телефоны, планшеты и ноутбуки бытового назначения. Данные регистрировались в режиме screenshot. Характеристики источников помех представлены на рис. 1 и 2. Исследования, проведенные путем анализа характеристик, предлагаемых на рынке источников помех, показали, что они могут быть классифицированы как 1, 2 и 5. Это объясняется тем, что когерентный и шумоподобный сигналы с частотой ПСП сигнала АПГСН легко генерировать. Это касается и сигнала 2. Он представляет собой ЧМ-сигнал с частотой повторения, близкой к частотному разнесу между каналами.

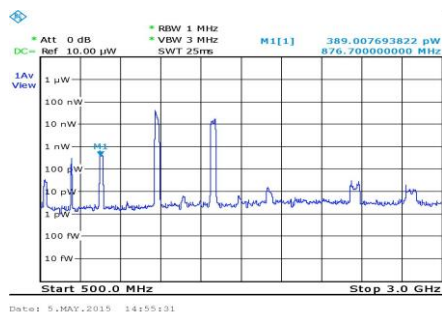


Рис. 1. Спектральная характеристика многодиапазонного источника помех

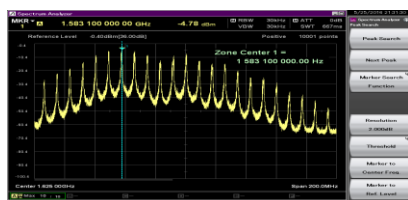


Рис. 2. Спектральная характеристика однодиапазонного источника помех

На основании экспериментов в безэховой камере была оценена потенциальная пороговая устойчивость для 3 видов помех, которая оценена как  $-140$  дБ.

Во время предварительных экспериментов была поставлена задача определить уровень помехового сигнала, прекращающего нормальное функционирование АП. При этом экспериментально было определено, что при «прямой видимости» граничная точка обнаружения GPS и сигналов ГЛОНАС возникает при плотности потока мощности излучения помех порядка  $-130...-140$  дБ. При этом источник помех находился в дальней зоне антенны АП на расстоянии  $10-15$  м при этом наблюдалась зависимость этой оценки от спутниковой и окружающей ситуации. Дальнейшие исследования проводились с целью определения географических зон размещения источников помех, которые блокируют работу навигаторов в условиях реальной местности и застройки. Исследовалась возможность подавления сигналов ГССН в условиях реальной местной обстановки с учетом рельефа и застройки.

Теоретическая модель распространения сигналов в частотном диапазоне АПГСН строилась на основании рекомендации Р1812 3 МСЭ с вероятностями 99 % для времени и мест. Предполагалось, что условия распространения соответствуют принципу взаимности. Виртуальный источник помех располагался на высотах от  $1,5$  до  $50$  м, что соответствует реальной ситуации с использованием наземного источника помех и источника, размещаемого на БПЛА. Мощность источника помех варьировалась от  $0,001$  до  $10$  Вт. Рассчитывалась географическая зона при расположении, в которой источник помех создавал недопустимый уровень для нормального функционирования приемника АПГСН, расположенного на высоте  $1,5$  м. АПГСН с полосковой антенной размером  $25 \times 25$  м размещался на экранах металлического типа размерами от  $250$  до  $300$  мм. Расстояние между подложкой антенны и экрана составляло  $20$  мм. Экран устанавливался на диэлектрическом основании.

Оценка результатов эксперимента показала, что наилучшими характеристиками обладают поглощающие экраны, улучшающие соотношение с/ш на  $5-8$  дБ при наличии помехи на высоте до  $5$  м. Применение металлического экрана слабо сказывается на соотношении с/ш.

Некоторые типичные результаты одного расчетов приведены на рис. 3–5. Выбор точки размещения АП существенно сказывается на точности местоопределения. Подавление сигналов от спутников происходит неравномерно. В первую очередь поражаются спутники, расположенные близко к горизонту. Сигналы GPS более устойчивы к помехам или АПГСН. Причины этого не выявлены. В том случае, когда неподавленными остаются сигналы 4-х и более спутников, точность местоопределения практически не снижается. Это проиллюстрировано на рис. 6 и 7. Зоны размещения источников, представляющих потенциальную опасность, приведены на рис. 3, 4 и 5. Они были получены для предполагаемой мощности излучения помехи  $1$  Вт. Высоты расположения источника помехи варьировались от  $1,5$  до  $50$  м. Подтвержден достаточно очевидный вывод о том, что с увеличением высоты размещения передатчика помех, зона возможной постановки помех расширяется и становится

более равномерной, но, тем не менее, она не достигает круговой формы даже для больших высот расположения источника помех.

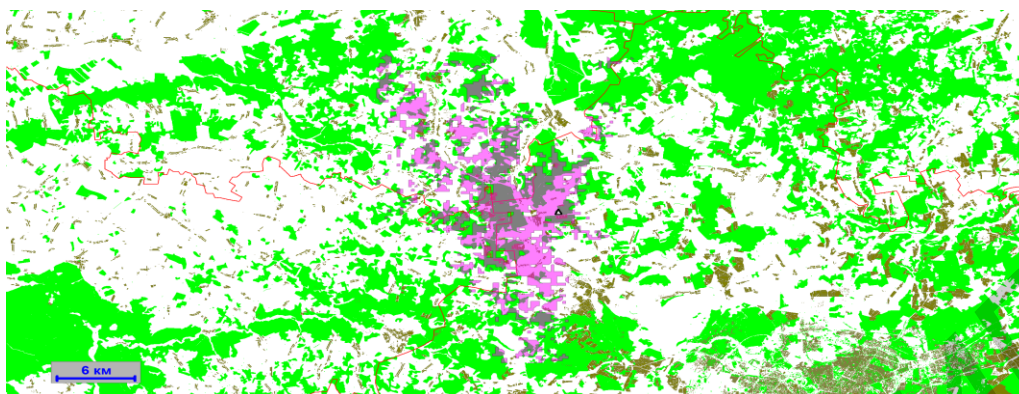


Рис. 3. Зона возможной постановки помех для высоты источника помех 1,5 м

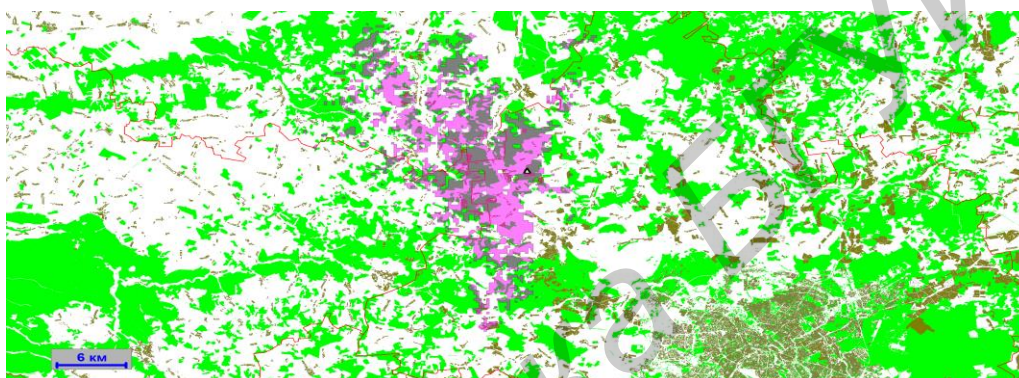


Рис. 4. Зона возможной постановки помех для высоты источника помех 5 м

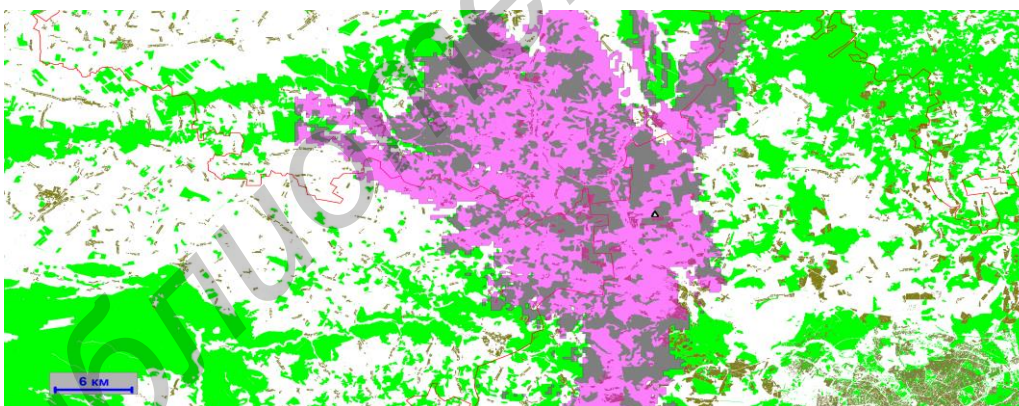


Рис. 5. Зона возможной постановки помех для высоты источника помех 50 м

На рис. 6 и 7 приведены координаты зоны расчета и эксперимента и типичные параметры ситуации на границе функционирования АП навигатора для безпомеховой ситуации и при наличии помехи уровнем около  $-140$  дБ.



Рис. 6. Параметры АП навигатора при безпомеховой ситуации



Рис. 7. Параметры навигатора в условиях помех однодиапазонного источника помех с уровнем  $-140$  дБ в месте расположения АП

### Заключение

В результате исследований была рассмотрена методика определения зоны потенциального размещения источника помех, приводящего к нарушению функционирования абонентских спутниковых навигаторов.

При решении задачи определены пороговые значения мощности помехового сигнала в месте расположения приемника. Определены зоны размещения потенциального источника помех. Зоны рассчитывались в соответствии с Рекомендациями МСЭ Р1812 3 путем варьирования высоты размещения источника помех и диаграммы направленности приемника навигационного сигнала. Результаты расчетов показали, что зона возможной постановки помех зависит от географических условий и в выбранном, типичном для Беларуси районе, не имеет радиальной формы до высот размещения источника помех вплоть до 50 м. При малых высотах размещения источников помех зона существенно зависит от параметров антенной системы приемника.

Результаты применения методики позволяют уточнить потенциальные географические зоны размещения источников помех, нарушающих функционирование систем спутниковой навигации и оценить потенциальные угрозы, возникающие при этом.

### Список литературы

1. Littlepage R.S. The Impact of Interference on Civil GPS // Proceedings ION GPS-98. September 1998. P. 821–828.
2. Bond L. Overview of GPS Interference Issues // GPS Interference Symposium – Volpe National Transportation System Center. Boston, August 27, 1998. P. 28–32.
3. Кораблев М.Е., Тикко Б.Б. Спутниковая геодезическая аппаратура ГЕО-161 // Новости навигации. 2004. № 1. С. 36–42.
4. In-Band Interference Suppression for GPS/GLONASS / M. Zhodzishsky [et al.] // Proceeding of ION GPS 98. September 1998. P. 769–773.
5. GPS Receiver Laboratory RFI Tests / B. Winer [et al.]. // Proceedings of the Institute of Navigation National Technical Meeting. Santa Monica, CA, January 22–24, 1996. 84 p.
6. Hopkins J. University Applied Physics Laboratory // GPS Risk Assessment Study – Final Report. January 1999. 125 p.
7. Forssel B., Olsen T.B. Jamming Susceptibility of Some Civil GPS Receivers // GPS World. 2003. № 1. P. 54–58.
8. Уязвимость спутниковых навигационных систем при воздействии непреднамеренных и преднамеренных помех и перспективы повышения надежности координатно-временного обеспечения / В.С. Жолнеров [и др.]. // Новости навигации. 2004. № 1. С. 21–35.
9. Абукраа А.С., Вилькоцкий М.А. Применение экранирования при подавлении нежелательных каналов приема абонентских спутниковых навигаторов // Докл. БГУИР. 2017. № 2 (104). С. 84–91.
10. Радиопоглощающие конструкции на основе композиционных влагосодержащих волокнистых материалов растительного происхождения / Г.А. Пухир [и др.]. // Докл. БГУИР. 2015. № 1 (87). С. 34–40.

### References

1. Littlepage R.S. The Impact of Interference on Civil GPS // Proceedings ION GPS-98. September 1998. P. 821–828.
2. Bond L. Overview of GPS Interference Issues // GPS Interference Symposium – Volpe National Transportation System Center. Boston, August 27, 1998. P. 28–32.

3. Korablev M.E., Tikko B.B. Sputnikovaja geodezicheskaja apparatura GEO-161 // Novosti navigacii. 2004. № 1. S. 36–42. (in Russ.)
4. In-Band Interference Suppression for GPS/GLONASS / M. Zhodzishsky [et al.] // Proceeding of ION GPS 98. September 1998. P. 769–773.
5. GPS Receiver Laboratory RFI Tests / B. Winer [et al.]. // Proceedings of the Institute of Navigation National Technical Meeting. Santa Monica, CA, January 22–24, 1996. 84 p.
6. Hopkins J. University Applied Physics Laboratory // GPS Risk Assessment Study – Final Report. January 1999. 125 p.
7. Forsell B., Olsen T.B. Jamming Susceptibility of Some Civil GPS Receivers // GPS World. 2003. № 1. P. 54–58.
8. Ujazvimost' sputnikovyh navigacionnyh sistem pri vozdejstvii neprednamerennyh i prednamerennyh pomeh i perspektivy povyshenija nadezhnosti koordinatno-vremennogo obespechenija / V.S. Zholnerov [i dr.]. // Novosti navigacii. 2004. № 1. S. 21–35. (in Russ.)
9. Abukraa A.S., Vil'kockij M.A. Primenenie jekranirovanija pri podavlenii nezhelatel'nyh kanalov priema abonentskih sputnikovyh navigatorov // Dokl. BGUIR. 2017. № 2 (104). S. 84–91. (in Russ.)
10. Radiopogloshhajushhie konstrukcii na osnove kompozicionnyh vlagosoderzhashhih voloknistyh materialov rastitel'nogo proishozhdenija / G.A. Puhir [i dr.]. // Dokl. BGUIR. 2015. № 1 (87). S. 34–40. (in Russ.)

#### **Сведения об авторах**

Абукраа А.С., аспирант кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Вилькоцкий М.А., д.т.н., профессор, профессор кафедры информатики и основ электроники Белорусского государственного педагогического университета им. М. Танка.

Лыньков Л.М., д.т.н., профессор, профессор кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

#### **Information about the authors**

Abukraa A.S., PG student of information security department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Vilkotsky M.A., D. Sci., professor, professor of informatics and electronics basics department of Belarusian state pedagogical university named after M. Tank.

Lynkov L.M., D. Sci., professor, professor of the information security department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

#### **Адрес для корреспонденции**

220050, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. Советская, д. 18,  
Белорусский государственный педагогический  
университет им. М. Танка  
тел. +375-29-651-05-01;  
e-mail: janmar@mail.ru;  
Вилькоцкий Марат Антонович

#### **Address for correspondence**

220050, Republic of Belarus,  
Minsk, Sovetskaya st., 34,  
Belarusian state pedagogical  
university named after M. Tank  
tel. +375-29-651-05-01;  
e-mail: janmar@mail.ru;  
Vilkotsky Marat Antonovich