

## **Использование ГНСС-сигналов для мониторинга состояния морской поверхности**

Д.О. Попов<sup>1</sup>, В.И. Луценко<sup>1</sup>, И.В. Луценко<sup>1</sup>, М.Ф. Бабаков<sup>2</sup>, Цзьян Гуо (Qiang Guo)<sup>3</sup>, Юн Джин (Yu Zheng)<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, 61000, Харьков, ул. Ак. Проскуры, 12, e-mail: lutsenko@ire.kharkov.ua

<sup>2</sup> Национальный аэрокосмический университет имени Н. Е. Жуковского, 61000, Харьков, ул. Чкалова, 17, e-mail: AutonotEnergy@khai.edu

<sup>3</sup> Харбинский инженерный университет, Министерство промышленности и информации из Китайской Народной Республики, Китай, Харбин, КНР, e-mail: guoqiang@hrbeu.edu.cn

<sup>4</sup> Институт электроники и информатики Циндаоского университета, Циндао, КНР, e-mail: susecc@mail.ru

*Рассматривается вопрос о применении сигналов систем глобальной спутниковой навигации для диагностики морской поверхности. Анализируется поведение навигационных сигналов при различных типах подстилающей поверхности и различном уровне волнения моря.*

*The question of using signals of global satellite navigation systems for diagnosing the sea surface. The behavior of navigation signals is analyzed for different types of underlying surface and for different levels of sea waves.*

### **Введение**

Дистанционное зондирование Земли при помощи спутниковых систем на сегодняшний день является одним из самых перспективных и интенсивно развивающихся направлений связанных с мониторингом процессов протекающих на планете. Огромное количество космических программ, направленных на исследование глобальных процессов в атмосфере и на поверхности Земли, обусловлено тем, что спутниковые системы позволяют получать информацию в реальном времени и проводить измерения в труднодоступных местах, где использование наземных систем затруднительно и крайне дорогостояще. Интерес к глобальному мониторингу и системам наблюдения вызван необходимостью прогнозирования и оценки процессов антропогенного и природного происхождения, изменений климата, последствий загрязнения окружающей среды, сейсмической активности и т.п. На сегодняшний день активно развиваются подходы связанные с использованием сигналов существующих систем, в том числе изначально не предназначенных для целей мониторинга, что позволяет минимизировать затраты на исследования и получить систему не требующую введения в эксплуатацию дополнительных изменений. Активно изучается взаимосвязь между изменениями параметров навигационных сигналов ГНСС и процессами, происходящими в ионосфере и тропосфере Земли, что позволяет решать сразу 2 задачи: создание методов диагностики, то есть решения обратной задачи и улучшение характеристик точности навигационных приемников, основным источником ошибок которых как раз и являются процессы в атмосфере планеты. Однако помимо анализа прямого сигнала, который подвергается влиянию окружающей среды, интересен также вопрос связанный и с изучением отраженных сигналов от земной поверхности, который несет в себе информацию о ее состоянии [1, 2].

В данной работе была произведена попытка проанализировать влияние состояния морской поверхности на сигналы ГНСС, принимаемые вблизи береговой линии Черного моря.

## 1. Методика измерений

Для проведения навигационных накоплений использовался мобильный комплекс с одночастотным ГНСС-приемником, антенна которого располагалась на мачте высотой 4 метра (см. рис. 1а). Измерительный комплекс производил прием сигналов при различных уровнях волнения морской поверхности и позволял регистрировать сигналы спутников даже на отрицательных углах визирования.

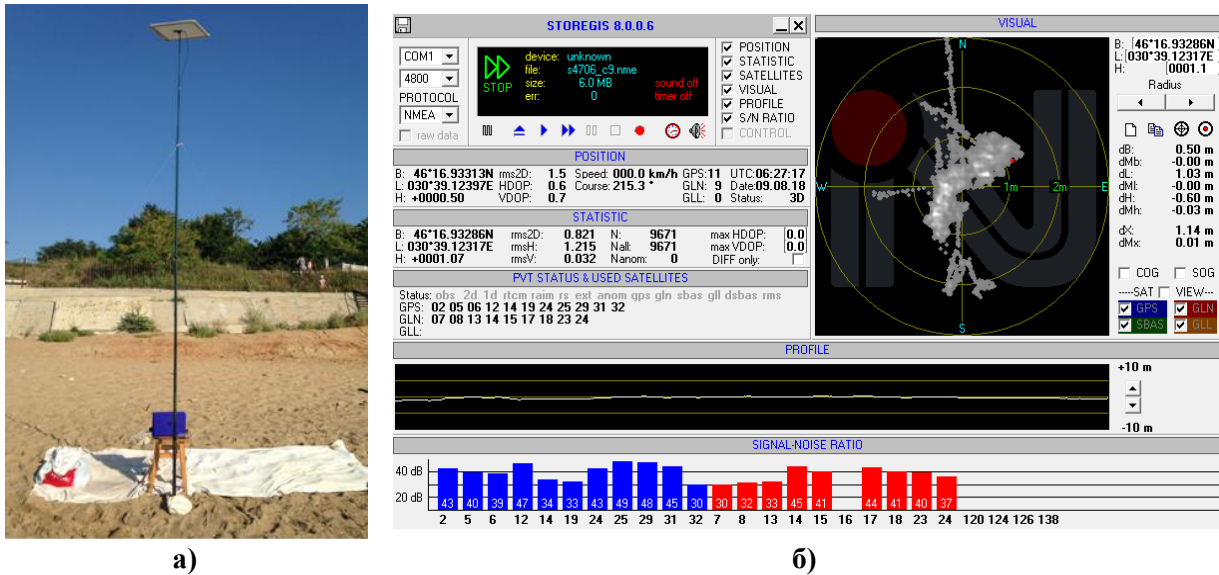


Рис. 1. Внешний вид измерительного комплекса (а) и интерфейс программы накопления навигационных данных (б).

Антенна располагалась возле береговой линии для регистрации навигационных сигналов под углами ниже 30 градусов, где на излучения заходящих и восходящих спутников будет оказывать влияние отражение от приводного слоя. Отметим, что диаграмма приемной антенны сформирована таким образом, чтобы минимизировать влияние сигналов с нижней полуплоскости, поэтому при высоких углах визирования спутника вклад отраженных лучей существенно снижается. Положение антенны на местности и расположение спутников во время измерений показано на рис. 2.

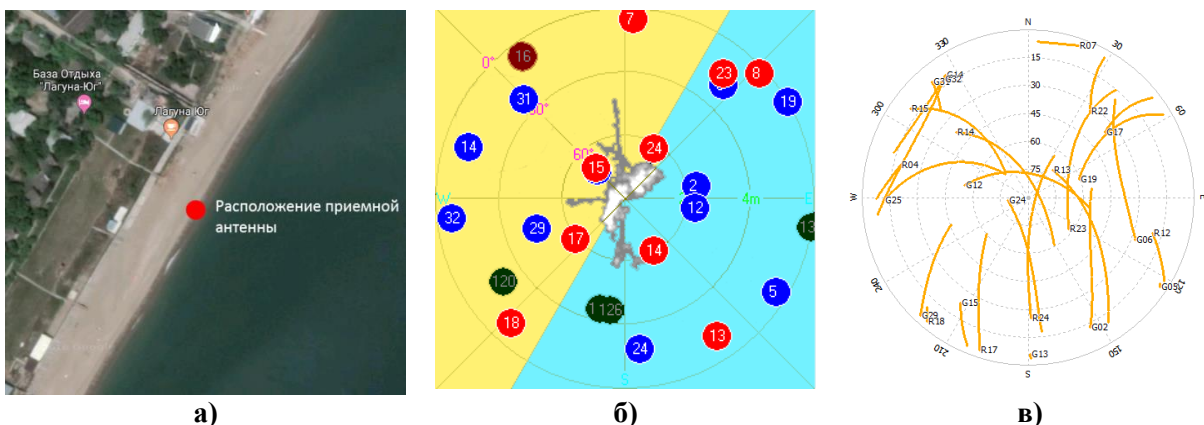


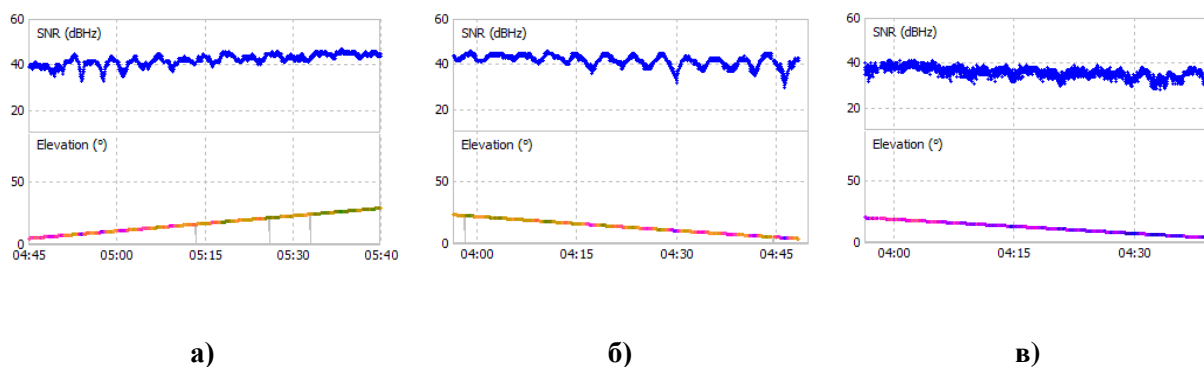
Рис. 2. Расположение измерительного комплекса (а), мишень с измеряемыми координатами (б), положение спутников во время навигационных накоплений (в).

Необходимо отметить, что для изучения подстилающей поверхности необходимо использовать углы визирования выше 4-5 градусов, так как на более низких углах сильное влияние будет оказывать рефракция, вклад которой будет маскировать

интерференционный эффект. При регистрации навигационных сигналов в рамках проводимых экспериментов предполагается, что результирующие сигналы в модели спутник – подстилающая поверхность – приемная антенна будут представлять собой сумму прямого и отраженного от морской поверхности сигналов. Таким образом, при наличии морского волнения в регистрируемом сигнале будут появляться флуктуационные компоненты, частота и интенсивность которых будет зависеть от шероховатости источника отраженного сигнала. В экспериментах за основу брались данные спутников GPS из-за повторяемости их орбит, что позволяло исследовать одни и те же участки морской поверхности при различных ее состояниях.

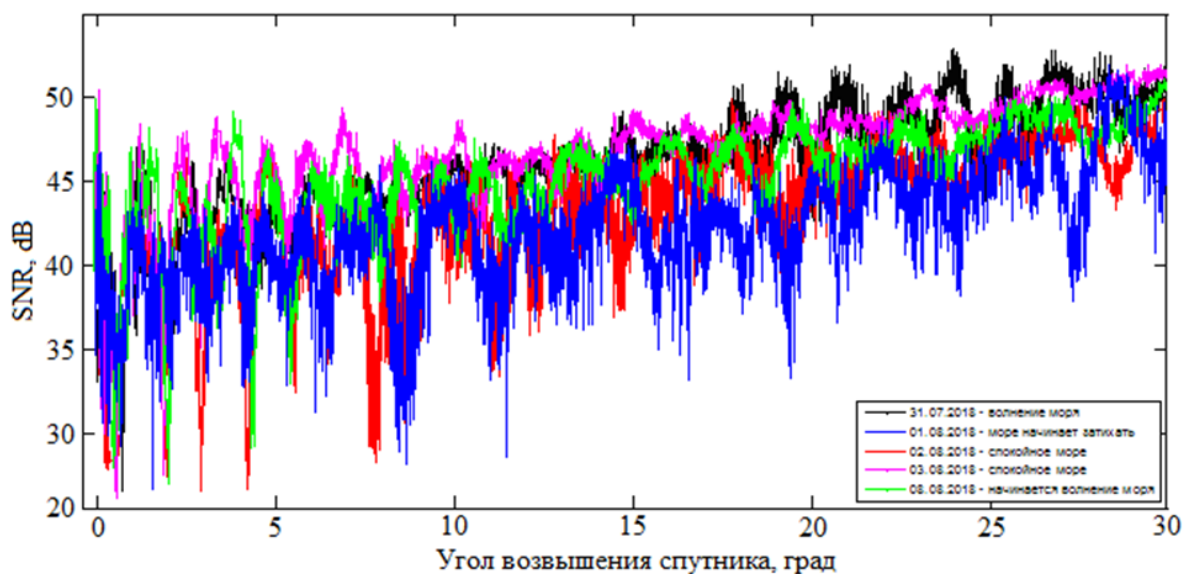
## 2. Результаты эксперимента

Навигационные данные, полученные от спутников, позволяют анализировать временные и угломестные зависимости уровней сигналов. Как видно из рис. 2б. одновременно могут наблюдаться спутники, находящиеся примерно под одним и тем же углом визирования, однако имеющие различные азимутальные направления, что позволяет сопоставить поведение сигналов, характер и интенсивность которых должна отличаться для различных состояний подстилающей поверхности. На рис. 3 приведены заходы и восходы спутников в трех направлениях, угол визирования которых имеет аналогичный характер. Видно, что уровни сигналов спутников, траектория которых проходит над сухопутной зоной (рис. 3а, б), имеют больший период флуктуаций в отличие от спутника, траектория которого направлена в сторону морской поверхности, где присутствует высокочастотная компонента при наличии слабого волнения моря (рис. 3 в). Необходимо отметить, что для сравнения использовались как спутники GPS, так и спутники системы ГЛОНАСС, однако характер поведения сигналов на схожих траекториях движения спутников носит аналогичный характер, что позволяет сопоставлять данные от различных систем для одновременных измерений.

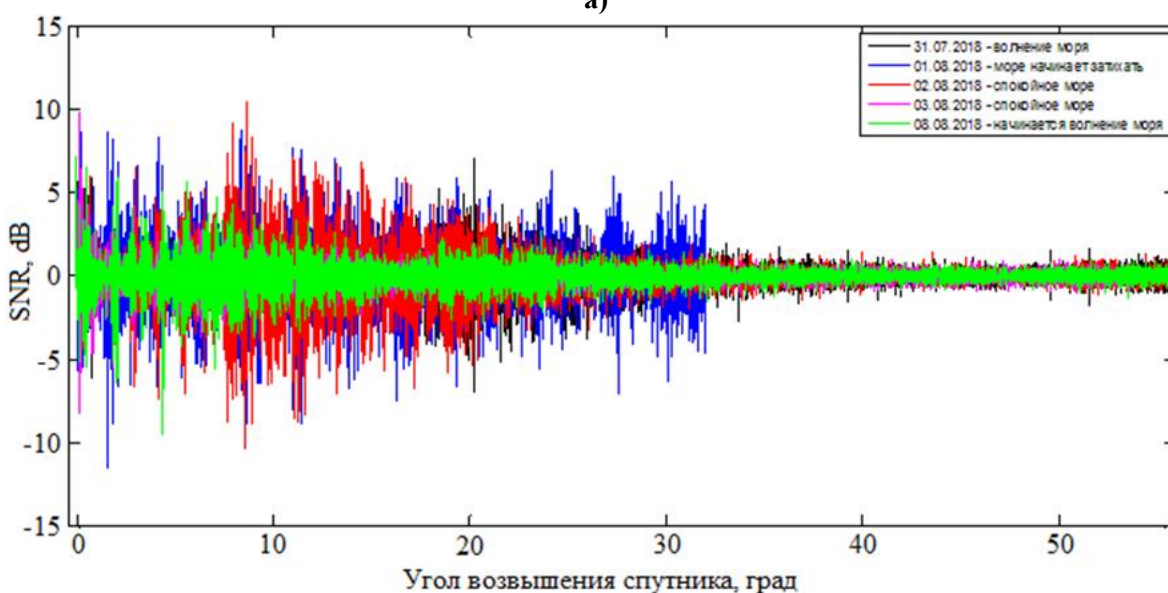


**Рис. 3. Отличие сигналов навигационных спутников в зависимости от траектории движения а) GPS29 – направление на берег, б) GPS15 – направление вдоль береговой линии, в) GLN12 – направление на море.**

Для анализа были выбрано 5 дней, на протяжении которых наблюдалось морское волнение различной интенсивности. Отметим, что при спокойном состоянии моря или слабом волнении морской поверхности, флуктуации, наблюдаемые у спутников, пролетающих в направлении перпендикулярном береговой линии, носят стабильно убывающий характер с повышением угла визирования, что объясняется постепенным уменьшением влияния атмосферы (за счет уменьшения толщины слоя, через который проходит сигнал) и отраженных лучей. Из полученных результатов видно, что наличие моря в качестве отражающей поверхности приводит к подмешиванию высокочастотных флуктуаций, уровень которых примерно одинаковый для всех дней (рис. 4).



а)

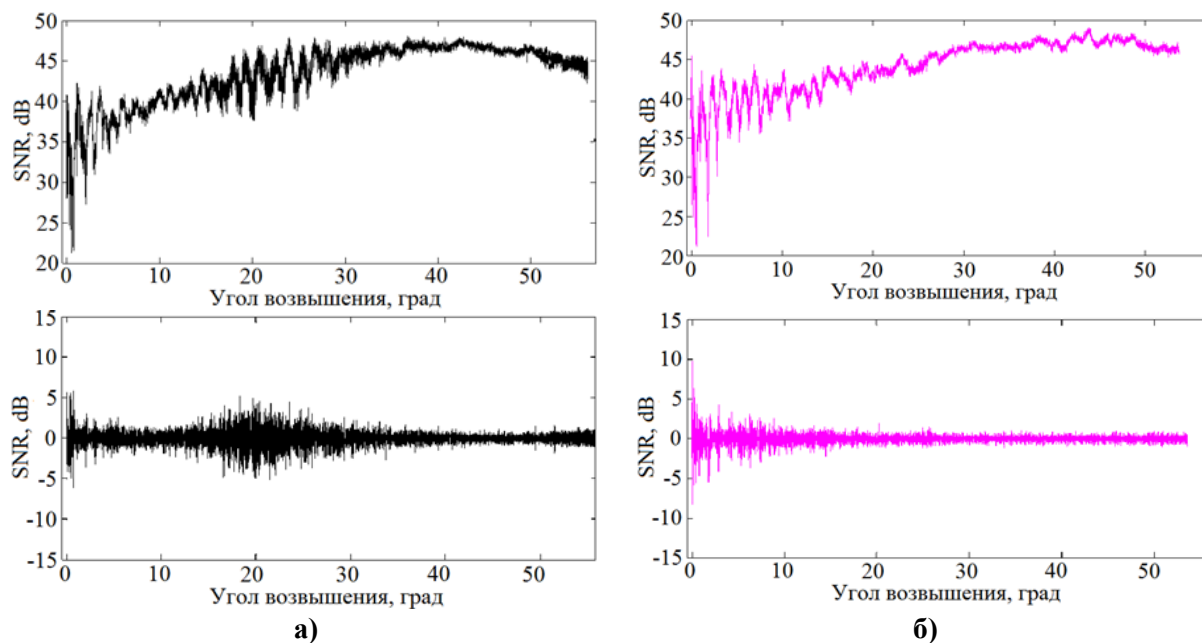


б)

**Рис. 4. Уровни сигналов (а) и амплитуды флуктуаций сигналов (б) от спутника в направлении на море.**

Однако при повышении уровня волнений, в флуктуационной составляющей возникают особые участки связанные, скорее всего, с нестационарностью источника (рис. 5). На рис. 4 и 5 приведены уровни принимаемых сигналов для спутника GPS02 и амплитуда флуктуаций, полученная путем вычитания  $(i - 1)$ -го отсчета и  $i$ -го. При анализе сигнала необходимо разделять наблюдение на несколько участков:

- до 3 - 4°, где уровень сигнала существенно возрастает за счет значительного увеличения толщины атмосферного влияния [3];
- от 4° до 30°, где в зависимости от интенсивности морской поверхности могут наблюдаться интерференционные эффекты, спровоцированные локальными изменениями интенсивности отражения морских участков (рис. 5а).
- углы выше 30°, где волнение морской поверхности оказывает минимальный эффект.



**Рис. 5. Сигналы навигационного спутника в условиях сильного морского волнения (а) и спокойного моря (б).**

### **Результаты эксперимента и выводы**

В результате проведенных исследований показана возможность использования сигналов навигационных спутников для дистанционной диагностики морской поверхности и качественной оценки состояния морской поверхности. Экспериментально установлена изменчивость флуктуационной компоненты сигналов GNSS-спутников, рассеянных морской поверхностью и сушей. Показано, что при измерениях в направлении на море в навигационном сигнале наблюдается высокочастотная флуктуационная составляющая, не присущая измерениям над сушей. Эксперименты показывают, что уровни сигналов навигационных спутников чувствительны к изменению состояния подстилающей поверхности и уровню волнения, однако для перехода к количественным оценкам необходимо использовать дополнительные данные, позволяющие контролировать условия эксперимента, то есть уровень морского волнения и ветра.

### **Литература**

1. Сеницкий В. Б. О возможности использования излучения спутников GPS для диагностики морского волнения / В. Б. Сеницкий // Радиофизика электроника.– 2010.– 1(15), №3.– С. 58-64.
2. Исследование подстилающей поверхности при помощи излучения глобальной навигационной спутниковой системы / В. И. Луценко, Д. О. Попов, И. В. Луценко // Радиофизика и электроника.– 2016.– Т. 7(21) №1.–С. 31-39.
3. Mendes, V. B. (1999). Modeling the neutral-atmosphere propagation delay in radiometric space techniques. Ph.D. dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 199, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 353 pp.