

ФИЗИКА ЗЕМЛИ, АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

GNSS-рефлектометрия уровня Черного моря в экспериментах на стационарной океанографической платформе

А. М. Падохин,^{1,а} Г. А. Курбатов,¹ М. О. Назаренко,¹ В. Е. Смолов²¹ *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики атмосферы. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*² *Морской гидрофизический институт РАН. Россия, 299011, Севастополь, ул. Капитанская 2.*

Статья поступила 23.10.2017, подписана в печать 09.01.2018.

В работе представлены результаты оценки уровня Черного моря по данным GNSS-рефлектометрии в экспериментах на стационарной океанографической платформе. С использованием многоантенного GPS/ГЛОНАСС-приемника и струнного резистивного волнографа проведено исследование влияния расположения антенн и характеристик ветрового волнения на определение уровня моря по данным GNSS-рефлектометрии. Для выбранной геометрии эксперимента определены пороговые значения амплитуды и частоты ветровых волн, при которых становится невозможной оценка высоты уровня моря по данным GNSS-рефлектометрии.

ВВЕДЕНИЕ

Динамика среднего уровня поверхности Мирового океана играет значительную роль в развитии прибрежных территорий, что определяет важность мониторинга изменений его уровня в глобальном масштабе. Такие измерения традиционно проводятся с использованием сетей мареографов [1]. Кроме того, в последние десятилетия большой объем информации о глобальном распределении уровня Мирового океана получен с использованием данных спутниковой альтиметрии [2, 3]. Большой объем работ выполнен по калибровке данных альтиметрии по подспутниковым измерениям мареографов [4].

Вместе с тем данные мареографов несут в себе, помимо непосредственно измерений уровня Мирового океана, также вклад, вызванный движением земной поверхности. Эти движения обусловлены гляциоизостатическим выравниванием, косейсмическими и постсейсмическими деформациями, процессами субдукции и др. Разработано много подходов к учету вертикальных движений земной поверхности в многолетних рядах данных мареографов [5], в первую очередь с использованием моделей гляциоизостатического выравнивания [6].

С развитием глобальных спутниковых навигационных систем одним из очевидных решений проблемы учета вертикальных движений земной поверхности при оценке вариаций среднего уровня Мирового океана является использование высокоточных данных позиционирования [7–9], что требует размещения базовых GNSS-станций вблизи пунктов установки мареографов. При этом сигналы GNSS могут быть сами

использованы для зондирования морской поверхности. Такие методы основаны на измерениях параметров отраженных от водной поверхности GNSS сигналов для восстановления ее характеристик. Данные наблюдения можно проводить как на океанографических платформах и наземных станциях, располагающихся в непосредственной близости от береговой линии [10–15], так и на спутниках [16].

В настоящее время существуют два подхода к задаче наземной GNSS-рефлектометрии. Первый из них требует установки двух GNSS-антенн, вертикально разнесенных на заданное расстояние. При этом одна из антенн, направленная в зенит, должна иметь правую круговую поляризацию (соответствует поляризации прямого GNSS-сигнала), вторая антенна — направленная в надир, должна иметь левую круговую поляризацию (соответствует поляризации отраженного от водной поверхности GNSS-сигнала). Определение уровня отражающей водной поверхности происходит по разности известного априори расстояния между фазовыми центрами двух антенн и длины базовой линии между этими антеннами, определенной по данным GNSS [11]. Второй подход основан на эффекте многолучевости и не требует установки второй, направленной в надир антенны с обратной поляризацией [10, 12–15]. В настоящей работе используется второй из описанных выше методов.

Несмотря на то, что основной задачей обычной GNSS-антенны с правой круговой поляризацией является прием и усиление прямого сигнала, не вся энергия отраженного от водной поверхности сигнала эффективно подавляется. В первую очередь, это обусловлено диаграммой направленности антенны, в которой присутствуют боковые лепестки в нижней полусфере. Кроме того, на малых углах возвышения спут-

^а E-mail: padokhin@physics.msu.ru

ника в отраженном от водной поверхности сигнале присутствуют как лево- (доминирующая) так и правополяризованная компоненты, которые затем быстро убывают с ростом угла возвышения спутника [17]. Этим во многом объясняется выбор угла отсечки по возвышению $\sim 15^\circ$ для многих практических GNSS-приложений. Таким образом, на малых углах возвышения спутников GNSS для азимутов, обеспечивающих наличие отраженного от водной поверхности сигнала, в амплитудных данных GNSS, может наблюдаться интерференционная картина между прямым и отраженным сигналом. Схема эксперимента представлена на рис. 1.

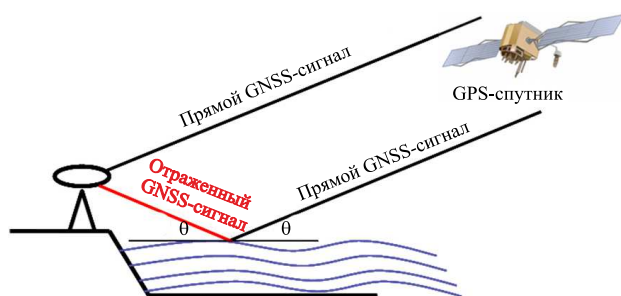


Рис. 1. Схема эксперимента по определению уровня водной поверхности по данным GNSS-рефлектометрии: антенна с правой круговой поляризацией, траектория распространения прямого GNSS-сигнала правой круговой поляризации (черная траектория), траектория распространения отраженного GNSS-сигнала преимущественно левой круговой поляризации (красная траектория)

Учитывая, что показатель преломления для радиоволн гигагерцового диапазона (сигналов GNSS) мало отличается от 1, для расчета разности фаз прямого и отраженного сигналов можно использовать простую геометрическую разность хода лучей. Исходя из этих соображений при отражении от плоской поверхности разность хода между прямым и отраженным лучами составляет $\Delta = 2h \sin \theta$, где θ — угол возвышения спутника, h — высота фазового центра антенны над отражающей поверхностью, которая при известных с высокой точностью координатах приемника может быть пересчитана в уровень моря. Таким образом, детрендрованные вариации амплитуды или соотношения сигнал—шум (SNR) принятого GNSS-сигнала на небольших углах возвышения спутника за счет многолучевости можно представить в виде:

$$\text{varSNR} \sim A \sin \left(\frac{4\pi h \sin \theta}{\lambda} + \varphi_0 \right), \quad (1)$$

где A — амплитуда колебаний, монотонно меняющаяся в зависимости от угла возвышения спутника; λ — длина волны GNSS-сигнала; φ_0 — некоторый фазовый сдвиг. Выделение тренда в данных амплитуды или SNR обычно проводится путем аппроксимации полиномом второго порядка. Таким образом, в экспериментальных

зависимостях $\text{varSNR}(\sin \theta)$ должны наблюдаться колебания с постоянной частотой $2h/\lambda$, которая может быть определена при анализе спектра вариаций амплитуды сигнала или SNR, что позволяет при известной длине волны GNSS-сигнала определить высоту фазового центра антенны над водной поверхностью. Отметим, что для получения данной интерференционной картины необходима запись SNR длительностью ~ 25 мин, что в среднем соответствует времени прохождения спутником GNSS углов возвышения от 5° до 15° . Любые изменения уровня поверхности на данном временном интервале будут усреднены, при этом подобные колебания приведут к уширению основной линии в спектре интерференционной картины, а также к появлению дополнительных гармоник меньшей интенсивности, которые будут играть роль шума при выделении основной периодики. Для выделения основной гармоники может использоваться, например, критерий превышения в 2 раза среднего значения амплитуды шума в спектре. Отметим также, что, кроме усреднения по времени, рассмотренного выше, в экспериментах подобного рода также происходит и усреднение по пространству из-за движения точки отражения при движении спутника. При этом характерный масштаб усреднения соответствует размеру первой зоны Френеля для навигационного сигнала на уровне водной поверхности. Как показано в [10], СКО невязки подобных измерений относительно измерений обычного мареографа составляет ~ 5 см, что можно считать хорошим результатом. Еще раз заметим, что выражение (1) справедливо для плоской горизонтальной отражающей поверхности. Влияние наклона поверхности на полученные результаты обсуждалось, например, в [18]. В то же время намного больший практический интерес представляет исследование влияния ветров [14] и характеристик волнения (специфичных для каждого пункта наблюдений) на полученные результаты, а также на саму возможность определения уровня водной поверхности методом GNSS-рефлектометрии.

В настоящей работе исследуется влияние характеристик ветрового волнения на определение уровня моря по данным GNSS-рефлектометрии в экспериментах на стационарной океанографической платформе в акватории Черного моря. Также рассматривается вопрос о влиянии геометрии размещения и ориентации приемных антенн, на данные GNSS-рефлектометрии.

1. ОПИСАНИЕ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Рассматриваемые в работе эксперименты проводились в период 13–17 августа 2017 г. на стационарной океанографической платформе (СОП) Черноморского гидрофизического полигона РАН в районе поселка Качивели. СОП расположена на расстоянии около 600 м от берега в юго-западной части Голубого залива в точке с координатами $44^\circ 23'$ с. ш.; $33^\circ 58'$ в. д.

Глубина моря в районе СОП почти постоянная и составляет 28–30 м, что исключает влияние рельефа дна на состояние морской поверхности. Платформа представляет собой конструкцию из железных свай, на которой смонтирована надстройка, состоящая из лабораторий, жилых и хозяйственных помещений. На СОП имеется 3 палубы — рабочая, жилая и верхняя, расположенные на высотах порядка 5 м, 12 м и 15 м над уровнем морской поверхности соответственно. Горизонтальный размер СОП 25×25 м.

Отметим, что в акватории Голубого залива отсутствуют ярко выраженные приливы и отливы (высота приливов не превышает 10 см). Это дает возможность при неизменном среднем уровне поверхности моря и практически постоянной геометрии проведения эксперимента сосредоточиться на исследовании влияния волнения, в первую очередь ветрового, на результаты применения метода GNSS-рефлектометрии.

Для решения поставленных задач использовалось следующее оборудование. Прием сигналов GNSS осуществлялся с помощью многоантенного приемника JAVAD DELTA-Q [19] и двух антенн JAVAD GrAnt-G3T [20], которые были закреплены в разных точках СОП. При этом точки крепления обеспечивали различные высоты фазовых центров антенн над поверхностью моря, а также их ориентацию в пространстве:

- антенна № 1 крепилась на высоте около 4 м от морской поверхности на выстреле длиной 8 м, выведенном с нижней палубы платформы перпендикулярно ее юго-восточному борту, и была направлена «в горизонт»; такая нетрадиционная для геодезических приложений ориентация антенны позволяет увеличить диапазон углов возвышения спутников, для которых наблюдается эффект многолучевости в амплитуде сигналов [13]; на данную антенну принимались сигналы GPS и ГЛОНАСС (рис. 2);
- антенна № 2 крепилась на высоте около 10 м от морской поверхности в юго-западном углу жилой палубы платформы и была ориентирована «в зенит»; на данную антенну принимались только сигналы GPS (рис. 2).

Как хорошо видно из рис. 2, азимутальные направления от 90° до 270° обеспечивают свободный прием отраженных от морской поверхности навигационных сигналов. Используемый приемник позволял получать данные о SNR S1 и S2 на двух рабочих частотах системы GPS ($f_1 = 1575.42$ МГц, $f_2 = 1227.60$ МГц) и ГЛОНАСС ($f_1 = 1602$ МГц, $f_2 = 1246$ МГц) для всех спутников в поле зрения обеих антенн с частотой опроса 1 Гц. Это позволяет получить две оценки высоты фазового центра антенны над поверхностью моря для каждого спутника GPS или ГЛОНАСС. Отметим, что в случае волнения оценки высоты на двух частотах будут немного отличаться за счет разницы в размерах областей, определяемых первой зоной Френеля,

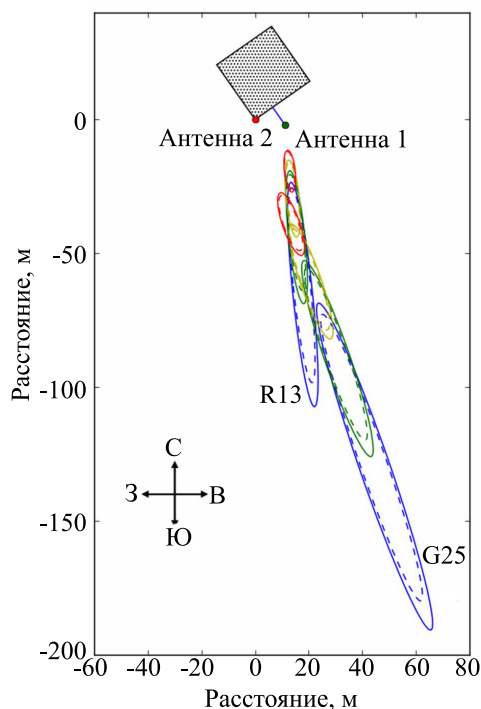


Рис. 2. Геометрия расположения GNSS-антенн на СОП, а также границы первой зоны Френеля для антенны 1 и спутника ГЛОНАСС-13 (R13) и для антенны 2 и спутника GPS25 (G25) на углах возвышения 5° (синие), 7° (зеленые), 10° (желтые), 15° (красные) для первой (сплошные линии) и второй (пунктирные линии) рабочих частот

по которым происходит пространственное усреднение. Различие в размерах первой зоны Френеля для двух рабочих частот систем GPS и ГЛОНАСС хорошо видно на рис. 2 на примере спутников GPS25 и ГЛОНАСС-13. Геометрия эксперимента позволяет за сутки получать оценки уровня водной поверхности для наблюдений ~ 30 радиовосходов и радиозаходов спутников GPS и ГЛОНАСС.

Для получения информации о волнении использовался резистивный струнный волнограф с частотой опроса 10 Гц разработки Морского гидрофизического института [21]. Волнограф располагался на отдельном 10-метровом выстреле юго-восточного борта платформы.

2. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Приведем пример полученных результатов. На рис. 3,а представлены записи вариаций SNR S1 (красные кривые) и S2 (синие кривые) в зависимости от синуса угла возвышения (диапазон углов от 5° до 15°) для пролета спутника ГЛОНАСС-13 (R13) для 14 августа 2017 г. по данным антенны № 1. Отметим, что в вариациях S1 и S2 хорошо прослеживаются периодики, обусловленные многолучевостью, вызванной отражением от водной поверхности, при этом амплитуда этих вариаций меняется очень

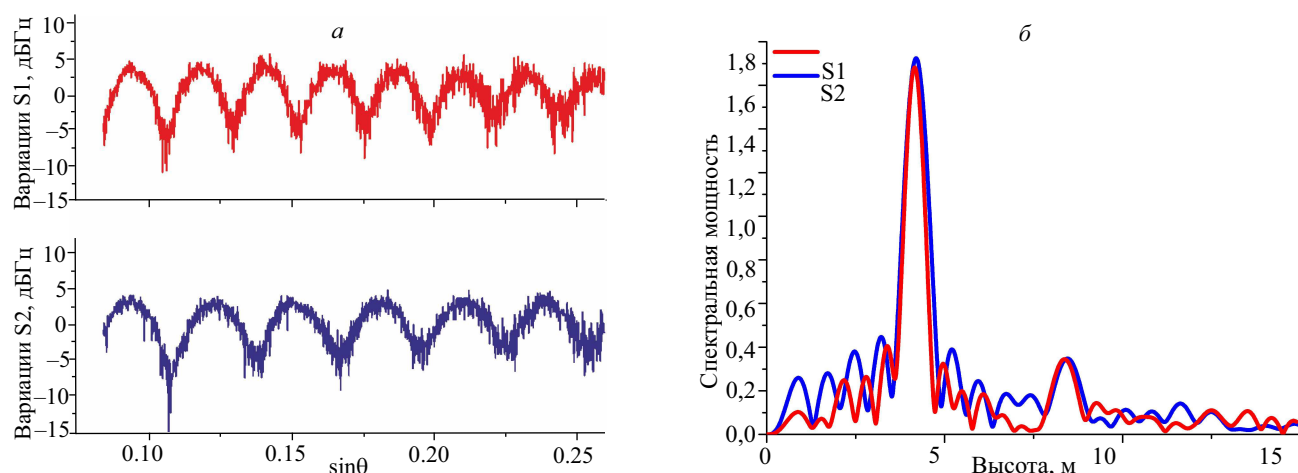


Рис. 3. Вариации SNR S1 и S2 (а) и спектры вариаций S1 и S2 (б) по данным с антенны №1 для пролета спутника ГЛОНАСС-13 (R13), 14 августа 2017 г.

слабо, что связано с ориентацией антенны №1 «в горизонт». Положение первой зоны Френеля для данного пролета приведено на рис. 2.

На рис. 3, б представлены спектры вариаций SNR S1 (красная кривая) и S2 (синяя кривая), представленных на рис. 3, а. Спектр вычислялся для всего периода радиовосхода спутника (диапазон углов от 5° до 15°). Частоты в спектре пересчитаны в высоту фазового центра антенны над отражающей поверхностью согласно (1). Видно, что оценки высоты, полученные на разных рабочих частотах, незначительно отличаются и составляют 4.16 м для первой частоты и 4.20 м для второй частоты соответственно. Это отличие, как указано выше, может быть связано с различными размерами первой зоны Френеля (пространственного масштаба усреднения) для двух рабочих частот. Отметим также существенное превышение значений амплитуды основной гармоники над уровнем шума для обеих рабочих частот, что характерно для условий неразвитого волнения, которые, как будет показано ниже, наблюдались в данный день.

Таким образом, для каждого наблюдения радиовосхода или радиозахода GNSS-спутника над поверхностью моря мы можем получить две оценки высоты фазового центра антенны над морской поверхностью и выбрать оптимальную с точки зрения соотношения амплитуды основной гармоники и уровня шума или просто взять среднюю величину [15].

Как было указано выше, особый интерес представляет изучение влияния волнения на результаты GNSS-рефлектометрии. Такие исследования разумно проводить на антенне, ориентированной «в зенит» (антенна №2), т. к. это позволяет использовать приемник не только для определения уровня морской поверхности, но и в других приложениях, включая мониторинг состояния тропосферы [22] и ионосферы [23]. Кроме того, удобно использовать спутники GPS, для которых,

благодаря параметрам их орбит, радиовосход и радиозаход происходят примерно в одно и то же местное время под одними и теми же азимутальными углами, что позволяет день ото дня воспроизводить практически идентичную геометрию эксперимента для выбранного спутника и исследовать влияние меняющихся характеристик волнения на данные GNSS-рефлектометрии.

За время проведения экспериментов наблюдались дни как с неразвитым, так и с хорошо развитым ветровым волнением. На рис. 4 приведены волнограммы для трех дней — 14, 16 и 17 августа 2017 г. с различными характеристиками волнения. Особый интерес представляет интервал 11–14 ч местного времени в каждый из этих дней, когда мы имеем отсутствие развитого волнения в первый день, и сильное волнение во второй и третий дни, причем амплитуда волн в третий день превышает амплитуду волн во второй день практически в два раза.

В данный период времени над поверхностью моря наблюдались радиовосходы и радиозаходы ряда

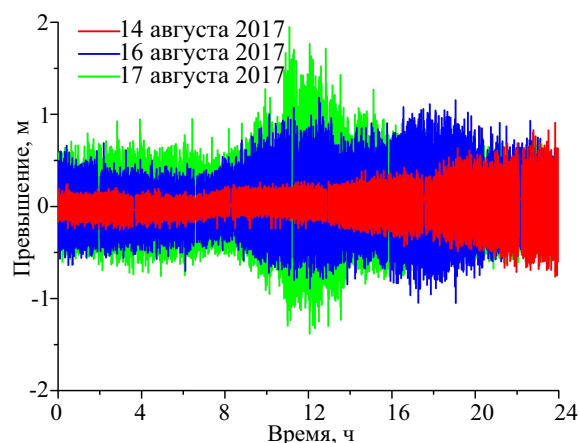


Рис. 4. Волнограммы для 14 августа (красная кривая), 16 августа (синяя кривая) и 17 августа (зеленая кривая) 2017 г.

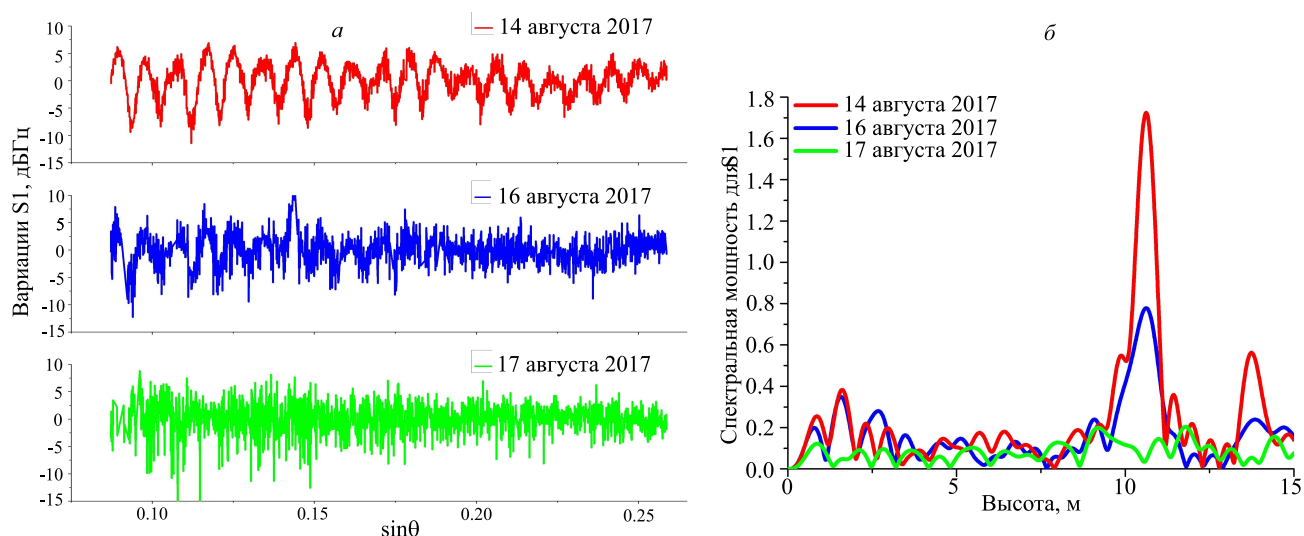


Рис. 5. Вариации SNR S1 (а) и спектры вариации SNR S1 (б) по данным с антенны № 2 для пролетов спутника GPS25, 14 августа (красная кривая), 16 августа (синяя кривая) и 17 августа (зеленая кривая) 2017 г.

спутников GPS. Остановимся подробнее на данных спутника GPS25, геометрия эксперимента показана на рис. 2. Средний азимутальный угол спутника составлял 161° , диапазон углов возвышения от 5° до 15° . При этом 14 августа использовались наблюдения в период 13:17:58–13:41:52 мск, 16 августа в период 13:09:59–13:33:53 мск и 17 августа в период 13:05:59–13:29:53 мск, соответственно.

На рис. 5, а представлены вариации SNR S1 с антенны № 2 для спутника GPS25 в рассматриваемые периоды наблюдений. Хорошо видно, что с ростом амплитуды волнения периодики, обусловленные многолучевостью, вызванной отражением от водной поверхности, прослеживаются все хуже, вплоть до полного их исчезновения на фоне шумов в данных за 17 августа.

Это еще лучше заметно в спектрах вариаций SNR S1 для каждого из рассматриваемых дней, представленных на рис. 5, б. Аналогично рис. 3, б частоты в спектре пересчитаны в высоту фазового центра антенны над отражающей поверхностью согласно (1). Видно, что уже 16 августа амплитуда основной гармоники спектра, вызванная отражением от поверхности моря, становится в два раза меньше по сравнению аналогичными данными за 14 августа, полученными в отсутствие развитого волнения. С дальнейшим развитием волнения 17 августа гармоника, связанная с отражением от поверхности моря, перестает выделяться в спектре вариаций S1. Это связано с сильным рассеянием и затуханием отраженного сигнала в условиях сильно развитого волнения. Аналогичная картина наблюдалась и в данных с антенны № 1.

Остановимся подробнее на характеристиках волнения в рассматриваемые три периода наблюдений. На рис. 6 представлены оценки спектров ветрового волнения и их доверительных интервалов с уров-

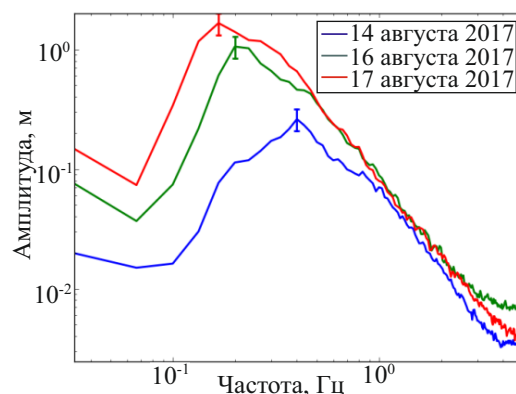


Рис. 6. Спектры волнения для рассматриваемых интервалов времени 14 августа (синяя кривая), 16 августа (зеленая кривая) и 17 августа 2017 г. (красная кривая)

нем 95%, построенные с помощью метода Уэлча [24] с 30 с окном Ханна [25] с половинным перекрытием для рассматриваемых интервалов радиовосходов спутника GPS25 (смотри выше). Видно, что с развитием ветрового волнения максимум спектра смещается в сторону меньших частот, при этом амплитуда волн возрастает. Сопоставляя рис. 5 и 6, можно сделать вывод, что пороговые значения частоты и амплитуды ветрового волнения, при которых в условиях проведения эксперимента перестает выделяться основная гармоника в спектре вариаций SNR S1 для спутников GPS, составляют порядка 0.2 Гц и 1.5 м, соответственно. Тем не менее, необходима большая статистика наблюдений, чтобы подтвердить или опровергнуть данный вывод. Имея такую статистику, в перспективе возможно, используя данные GNSS-рефлектометрии, определять не только динамику уровня морской поверхности, но и, возможно, балльность волнения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрен метод определения высоты уровня водной поверхности по данным GNSS-рефлектометрии с использованием одновременно двух рабочих частот систем GPS и ГЛОНАСС. Одновременное применение обеих навигационных систем позволяет существенно увеличить количество доступных измерений. Кроме того, использование данных обеих рабочих частот позволяет не только удвоить число определений высоты для каждого конкретного спутника, но также и выбрать оптимальную оценку, исходя из соотношения сигнал—шум в спектре. Показано, что на результаты GNSS-рефлектометрии существенным образом влияет характер волнения, вплоть до полной невозможности определения высоты уровня моря по GNSS данным. В условиях проведения описанного в работе эксперимента для антенны, располагавшейся на высоте около 11 м над поверхностью моря и ориентированной «в зенит», пороговые значения амплитуды и частоты ветровых волн, при которых перестает выделяться основная гармоника в спектре вариаций SNR S1 для спутников GPS, составляют порядка 0.2 Гц и 1.5 м соответственно. Несмотря на то, что GNSS-рефлектометрия не может в полной мере заменить измерения уровня моря с помощью мареографов и спутниковой альтиметрии, данный метод позволяет получать дополнительную полезную информацию в случае наличия достаточного количества GNSS-приемников в береговых зонах.

Авторы благодарны рецензенту и редактору, чьи ценные замечания позволили существенно улучшить подачу материала. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 17-77-20087.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IOC (Intergovernmental Oceanographic Commission) of UNESCO. Manual on sea level measurement and interpretation, IV: An update to 2006, IOC manuals and guides. JCOMM Technical Report No.31, WMO/TD. N 1339. Paris, 2006.
2. Nerem R. S., Chambers D. P., Choe C., Mitchum G. T. // *Marine Geodesy*. 2010. **33**, sup1. P. 435.
3. Masters D., Nerem R. S., Choe C. et al. // *Marine Geodesy*. 2012. **35**, sup1. P. 20.

4. Mitchum G. T. // *Marine Geodesy*. 2000. **23**. P. 145.
5. Zervas C., Gill S., Sweet W. *Estimating Vertical Land Motion from Long-Term Tide Gauge Records*. Technical Report NOS CO-OPS 065. 2013.
6. Douglas B. C., Kearney M. S., Leatherman S. P. *Sea Level Rise, History and Consequences*, International Geophysics Series. **75**. Academic Press, 2001.
7. Wöppelmann G., Miguez B. M., Bouin M. N., Altamimi Z. // *Global and Planetary Change*. 2007. **57**, N 3–4. P. 396.
8. Sella G. F., Stein S., Dixon T. H. et al. // *Geophys. Res. Lett.* 2007. **34**. L02306.
9. Snay R., Cline M., Dillinger W. et al. // *J. of Geophys. Res.* 2007. **112**. B04409.
10. Löfgren, J. S., Haas R., Johansson, J. M. // *Adv. Space Res.* 2011. **47**, N 2. P. 213.
11. Belmonte R. M., Martin-Neira M. // *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 2006. **3**, N 1. P. 28.
12. Larson K. M., Löfgren J. S., Haas R. // *Adv. Space Res.* 2013. **51**, N 8. P. 1301.
13. Santamaría-Gómez A., Watson C. // *GPS Solutions*. 2017. **21**, N 2. P. 451.
14. Löfgren J. S., Haas R., Scherneck H.-G., Bos M. S. // *Radio. Science*. 2013. **46**. RS0C05.
15. Padokhin A. M., Kurbatov G. A., Andreeva E. S. et al. // *Proc. SPIE 10466. 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. 30 November 2017.
16. Rose R., Gleason S., Ruf C. // *Proc. SPIE 9240. Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*. 2014. 924005.
17. Hannah B. M. *Modelling and simulation of GPS multipath propagation*, Ph.D. thesis, Queensland University of Technology. Brisbane, Australia, 2001.
18. Larson K. M., Nievinski F. G. // *GPS Solutions*. 2013. **17**, N 1. P. 41.
19. <http://www.javadgnss.ru/products/receivers/delta>
20. http://www.javadgnss.ru/doc/antennas/GrAnt_RUS_Datasheet.pdf
21. Малиновский В. В., Дулов В. А., Большаков А. Н. и др. // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2004. № 11. С. 236.
22. Нестеров И. А., Терешин Н. А. // *Изв. вузов. Физика*. 2016. **59**, № 12–3. С. 76.
23. Kunitsyn V. E., Nesterov I. A., Padokhin A. M., Tumanova Y. S. // *J. of Comm. Technology and Electronics*. 2011. **56**, N 10. P. 1269.
24. Welch P. // *IEEE Trans. Audio Electroacoust.* 1967. **15**. P. 70.
25. Blackman R. B. Tukey J. W. // *Bell System Technical Journal*. 1958. **37**. P. 185.

GNSS Reflectometry of the Black Sea Level in the Experiments at the Stationary Oceanographic Platform

A. M. Padokhin^{1,a}, G. A. Kurbatov¹, M. O. Nazarenko¹, V. E. Smolov²

¹*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Leninskie Gory, Moscow 119991, Russia.*

²*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Kapitanskaya str. 2, Sebastopol 299011, Russia.*

E-mail: ^apadokhin@physics.msu.ru.

The results of sea level estimation by GNSS reflectometry (GNSS-R) in the Black Sea in the experiments at the stationary oceanographic platform are presented. The influence of the layout of the antennas and the characteristics of the wind waves on the GNSS-R sea level estimates is studied with the use of multi-antenna GPS/GLONASS receiver and wire resistance wave gauge. For the selected geometry of the experiment, the threshold amplitudes and frequencies of the wind waves at which estimation of the sea level by GNSS reflectometry becomes impossible are determined.

Keywords: GPS, GLONASS, reflectometry, sea level, wind waves.

PACS: 93.85.-q.

Received 23 October 2017.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2018. **73**, No. 4. Pp. 422–427.

Сведения об авторах

1. Падохин А. М. — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-20-89, e-mail: padokhin@physics.msu.ru.
2. Курбатов Г. А. — вед. инженер; тел.: (495) 939-28-77, e-mail: kurbatov_ga@physics.msu.ru.
3. Назаренко М. О. — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-20-89, e-mail: m.o.nazarenko@mail.ru.
4. Смолов В. Е. — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: vladimir.smolov@mail.ru.