

## Доплеровский спектр радиолокационного СВЧ-сигнала обратного рассеяния: эксперимент на реке

М. С. Рябкова, В. Ю. Караев, М. А. Панфилова,  
Ю. А. Титченко, Е. М. Мешков, Э. М. Зуйкова

*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия*  
*E-mail: mrjabkova@gmail.com*

Проведены измерения доплеровского спектра отражённого радиолокационного сигнала при углах падения меньше  $30^\circ$  в случае стационарного речного течения. Для описания доплеровского спектра помимо традиционно используемых ширины и смещения применялись коэффициенты асимметрии и эксцесса, а также ширина доплеровского спектра, вычисляемая через 4-й и 2-й центральные моменты. Обработка данных показала, что в отличие от морского волнения коэффициент эксцесса максимален при малых углах падения и уменьшается при увеличении угла падения. Были построены зависимости ширины и смещения доплеровского спектра, сечения обратного рассеяния, коэффициентов асимметрии и эксцесса от угла падения и направления зондирования (азимутального угла). Для вычисления доплеровского спектра отражённого сигнала по теоретической модели необходима информация о статистических характеристиках волнения, которые находились по спектру волнения. Поверхностное волнение моделировалось с учётом скорости и направления течения. Выполненное сравнение модельных оценок и результатов эксперимента показало, что учёт течения в спектре волнения позволяет существенно улучшить совпадение теории и эксперимента. Наблюдаемое занижение смещения модельного доплеровского спектра по сравнению с экспериментом при направлении зондирования навстречу волнению требует дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** скорость и направление течения, ширина и смещение доплеровского спектра, метод Кирхгофа, малые углы падения, развивающееся ветровое волнение, коэффициенты асимметрии и эксцесса

Одобрена к печати: 14.09.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-213-227

### Введение

Морские течения оказывают сильное влияние на климат Земли, так как переносят огромное количество тепловой энергии (холодной/тёплой воды) из одного региона в другой. Например, достаточно мягкий климат Великобритании и Северной Европы формируется течением Гольфстрим. Однако в настоящее время только крупные геострофические течения могут быть измерены с помощью дистанционных методов (орбитальный радиовысотометр) с периодичностью около 10 сут. Присущие радиовысотометру недостатки хорошо известны: это низкое пространственное и временное разрешение.

Задача развития глобальной системы дистанционного мониторинга течений Мирового океана становится актуальной, и для измерения течения предлагается анализировать спектральные характеристики отражённого радиолокационного сигнала. Доплеровский спектр содержит информацию о движении рассеивающей поверхности, и для её восстановления требуется создание новых алгоритмов.

Измерение течения в морских условиях — достаточно сложная задача, поэтому в исследовательских целях рассматривался более простой случай: проведение измерений на реке, когда направление и скорость поверхностного течения известны или могут быть достаточно просто измерены.

Однако формирование поверхностного волнения в речных условиях имеет свои особенности, которые необходимо учитывать при численных оценках. Поэтому в первой статье основное внимание было уделено спектру поверхностного волнения на реке и теоретическому анализу влияния речного течения на ширину и смещение доплеровского спектра (Рябкова

и др., 2020). В настоящей работе будут рассмотрены результаты обработки измерений доплеровского спектра во время эксперимента на р. Оке в 2019 г. и выполнено сравнение с моделью доплеровского спектра при малых углах падения.

### Параметры доплеровского спектра

Обычно для описания доплеровского спектра используются только два параметра: ширина  $\Delta F$  и смещение  $f_{shift}$ . Для вычисления смещения по измеренному доплеровскому спектру применяют следующую формулу:

$$f_{shift} = \frac{\int f S_{DS}(f) df}{\int S_{DS}(f) df},$$

где  $S_{DS}(f)$  — форма измеренного доплеровского спектра. Интеграл по доплеровскому спектру даст сечение обратного рассеяния  $\sigma_0$ .

Определение ширины доплеровского спектра не выступает как общепринятое и отличается у разных авторов. Оставаясь в рамках введённых ранее определений (Караев и др., 2020; Panfilova et al., 2020), продолжим использовать следующую формулу для ширины доплеровского спектра:

$$\Delta F = 2 \sqrt{\frac{\int f^2 S_{DS}(f) df}{\int S_{DS}(f) df} - f_{shift}^2}.$$

В дополнение к нему введём ещё одно определение ширины доплеровского спектра, вычисляемое через моменты более высокого порядка:

$$\Delta F_{42} = \sqrt{\frac{\mu_4}{\mu_2}} = \sqrt{\frac{\mu_4}{\sigma^2}},$$

где  $\mu_n$  — центральный момент  $n$ -го порядка;  $\sigma^2$  — дисперсия. Для гауссовой формы доплеровского спектра формулу можно записать:

$$\Delta F_{42} = \sqrt{3\sigma^2} \approx 1,73\sigma \approx 0,865\Delta F. \tag{1}$$

Новая ширина доплеровского спектра  $\Delta F_{42}$  уже, чем исходное определение  $\Delta F$  для гауссовой формы спектра. Следовательно, ширина доплеровского спектра  $\Delta F_{42}$  содержит информацию о форме доплеровского спектра, которую можно использовать при анализе, — отличие отношения доплеровских спектров от теоретического свидетельствует, что в формировании доплеровского спектра участвует не только квазизеркальный механизм обратного рассеяния.

Эксперименты на морской океанографической платформе подтвердили, что при малых углах падения ( $<10^\circ$ ), когда коэффициенты асимметрии и эксцесса малы, форма доплеровского спектра близка к гауссовой (Караев и др., 2019б, 2020; Panfilova et al., 2020).

Форма измеренного доплеровского спектра может сильно отличаться от гауссовой, поэтому только ширины и смещения становится недостаточно для однозначной характеристики спектра. На иллюстрации спектры с одинаковыми шириной и смещением могут сильно различаться, поэтому форма доплеровского спектра становится дополнительным информационным параметром, характеризующим отражённый сигнал. Для доплеровского спектра будем использовать коэффициенты асимметрии  $A$  и эксцесса  $E$ , которые определены стандартным образом:

$$A = \frac{\mu_3}{\sigma^3} \text{ и } E = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3.$$

Впервые эти параметры использовались при обработке данных эксперимента на морской океанографической платформе (Караев и др., 2019а, 2020) и было показано, что новые

параметры доплеровского спектра позволяют предложить количественные критерии перехода от квазизеркального к резонансному рассеянию.

## Эксперимент

Для проведения измерений использовался когерентный доплеровский радиолокатор (длина волны 9,7 мм) с симметричной диаграммой направленности антенны ( $6 \times 6^\circ$ ), который был установлен на мосту через р. Оку в черте Нижнего Новгорода (рис. 1а) на высоте около 40 м. Схема эксперимента показана на рис. 1б.

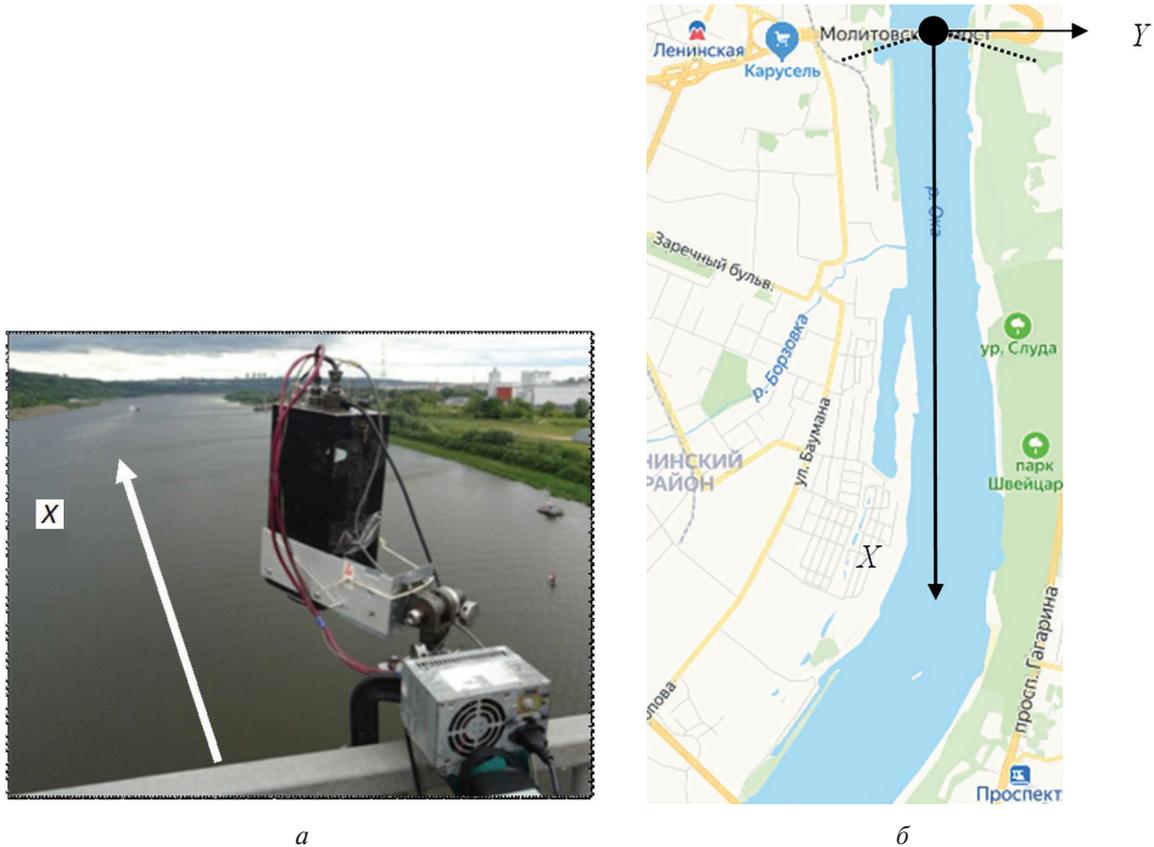


Рис. 1. Доплеровский радиолокатор во время эксперимента (а) и схема измерения (б). Чёрным кружком отмечено положение радиолокатора на мосту, пунктиром — сектор азимутальных углов, где проводились измерения

Скорость и направление ветра измерялись акустическим анемометром на высоте примерно 42 м. Скорость ветра была пересчитана на стандартную высоту 10 м по логарифмическому профилю ветра (Ламли, Пановский, 1966):

$$U_h = \frac{u_*}{0,4} \ln \left( \frac{h}{z_0} \right),$$

где  $h$  — высота;  $u_*$  — скорость трения;  $z_0$  — параметр шероховатости поверхности. Для оценки шероховатости поверхности использовалась модель, предложенная в работе (Masuko et al., 1986):

$$z_0 = \frac{0,000684}{u_*} + 0,428u_*^2 - 0,0443,$$

где  $z_0$  и  $u_*$  используются в сантиметрах и сантиметрах в секунду соответственно.

На рис. 2 показано изменение средней скорости (см. рис. 2а) и направления (см. рис. 2б) ветра во время эксперимента (усреднение примерно за 2 мин). Надо отметить, что при записи угол отсчитывался от направления на север. В дальнейшем направление ветра было привязано к выбранной системе координат. На рисунке ось  $X$  направлена против направления течения сверху вниз и ось  $Y$  — слева направо.

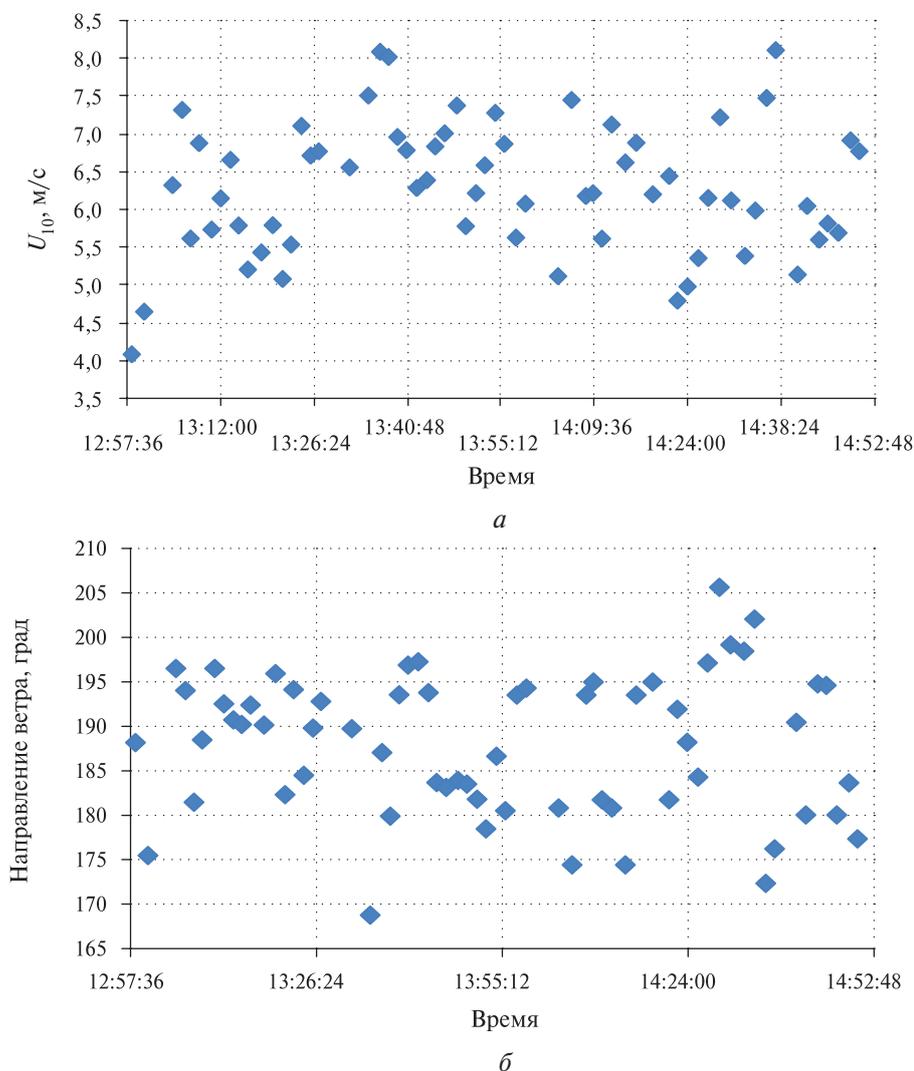


Рис. 2. Временная зависимость скорости (а) и направления (б) ветра по данным акустического анемометра во время эксперимента

Ширина реки в районе моста составляет примерно 0,5 км, направление течения в выбранной системе координат —  $180^\circ$ . Во время эксперимента направление ветра было также против оси  $X$ , поэтому доплеровский спектр отражённого радиолокационного сигнала имеет положительное смещение.

Во время эксперимента наблюдалась сильная изменчивость даже усреднённых величин скорости и направления ветра, что затрудняет моделирование, так как остаётся неопределённость в скорости и направлении ветра, которые надо использовать для расчётов и сравнения с экспериментом.

Изменчивость волнения обусловлена двумя факторами: 1) непостоянством скорости и направления ветра; 2) коротким ветровым разгоном. Максимальная длина прямого ветрового разгона составляет менее 4 км, так как русло реки имеет поворот (см. рис. 1). Это приводит к ограничению доминантной длины волны в спектре волнения и высоты волнения. Связь безразмерного и размерного разгона определяется следующей формулой:

$$\tilde{x} = \frac{xg}{U_{10}^2}.$$

В результате на водной поверхности присутствовало развивающееся ветровое волнение, которое и определяло свойства доплеровского спектра отражённого радиолокационного сигнала.

Для «борьбы» с изменчивостью ветро-волновой обстановки было максимально сокращено время одного измерения (до 1 мин) и один цикл измерений (изменение направления зондирования (азимутального угла) для фиксированного угла падения) проходил в примерно одинаковых ветро-волновых условиях. К сожалению, короткое время усреднения влияет на стабильность (достоверность) параметров доплеровского спектра, так как снижает эффективность некогерентного усреднения доплеровских спектров и сохраняется высокий уровень спекл-шума.

Для оценки временной изменчивости волнения применялся следующий подход. При измерении азимутальной зависимости для каждого угла падения выполнялось три измерения при направлении зондирования  $0^\circ$ : в начале, середине и в конце цикла.

Каждый цикл измерений по азимутальному углу (направлению зондирования) для фиксированного угла падения начинался с измерения при направлении зондирования  $0^\circ$ . После этого направление зондирования менялось, например на  $-15^\circ$ ,  $-30^\circ$ ,  $-45^\circ$ ,  $-60^\circ$ ,  $-75^\circ$  или  $-15^\circ$ ,  $-30^\circ$ ,  $-60^\circ$ . После этого снова измерения выполнялись при  $0^\circ$  и опять при  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  или  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ . И в завершение азимутального цикла снова измерялся доплеровский спектр при направлении зондирования  $0^\circ$ .

Было проведено несколько экспериментов в августе – октябре 2019 г. В настоящей статье мы обсуждаем эксперимент, который был выполнен 3 октября 2019 г. Основной его задачей было сравнение азимутальных зависимостей для квазизеркального и резонансного механизмов обратного рассеяния в присутствии речного течения. Измерения проводились под несколькими углами падения ( $7,4^\circ$ ;  $12,4^\circ$ ;  $17,4^\circ$ ;  $22,4^\circ$ ;  $27,4^\circ$ ).

Для измерения скорости течения использовалась видеокамера. При обработке выполнялась «раскадровка» и скорость поверхностного течения определялась по смещению объекта известного размера. В день эксперимента скорость течения составляла примерно  $0,3-0,4$  м/с. Для моделирования была выбрана скорость  $0,35$  м/с.

В данной статье основное внимание будет уделено малым углам падения ( $7,4^\circ$ ;  $12,4^\circ$ ), чтобы на их примере сравнить теорию и эксперимент.

## Обработка данных

При обработке вычислялся доплеровский спектр отражённого радиолокационного сигнала и определялись ключевые параметры: смещение, ширина, коэффициенты эксцесса и асимметрии, сечение обратного рассеяния. Больше всего измерений было выполнено для нулевого азимутального угла (против течения), поэтому начнём анализ данных для этого азимутального угла.

На *рис. 3* (см. с. 218) показана зависимость смещения (см. *рис. 3а*) и ширины доплеровского спектра (см. *рис. 3б*) от угла падения: звёздочки — ширина  $\Delta F$  и кружки — ширина  $\Delta F_{42}$ . Измерения были выполнены при направлении зондирования  $0^\circ$ .

Как и ожидалось, с увеличением угла падения происходит рост смещения доплеровского спектра. Значительный разброс величины смещения наблюдается при угле падения  $27,4^\circ$  и формально может быть объяснён большей изменчивостью асимметрии доплеровского спектра (*рис. 4а*, см. с. 218). С точки зрения физики это обусловлено изменением соотношения между квазизеркальным (более быстрым) и резонансным (более медленным) механизмами обратного рассеяния, формирующими отражённый сигнал.

На *рис. 4* приведены зависимости коэффициентов асимметрии (см. *рис. 4а*) и эксцесса (см. *рис. 4б*) от угла падения. Для примера кружками показаны значения коэффициентов,

полученные в эксперименте на океанографической платформе (Караев и др., 2019а, б). Различие в знаках коэффициента асимметрии связано с направлением зондирования: на Чёрном море волна «бежала» от радиолокатора, а на реке — навстречу.

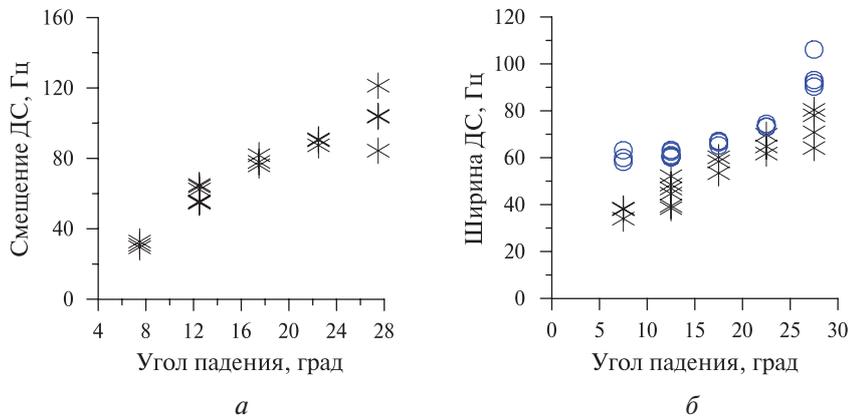


Рис. 3. Зависимость смещения (а) и ширины (б) доплеровского спектра от угла падения: ширина доплеровского спектра  $\Delta F$  обозначена звёздочками,  $\Delta F_{42}$  — кружками. Направления зондирования по оси X

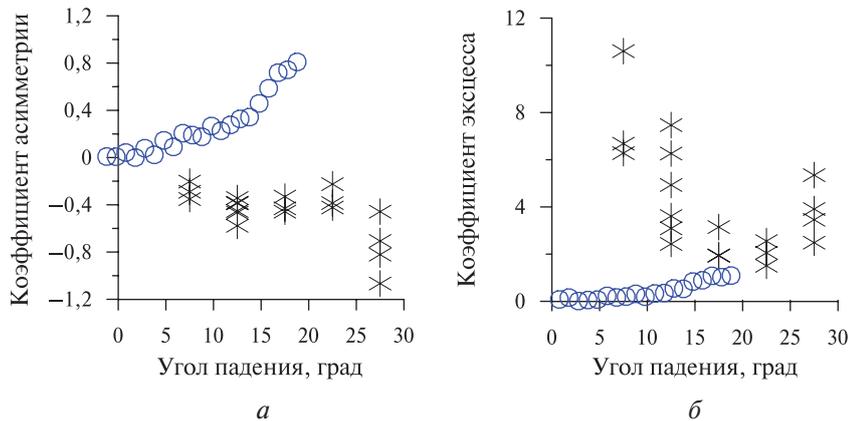


Рис. 4. Зависимость коэффициента асимметрии (а) и коэффициента эксцесса (б) доплеровского спектра от угла падения

Из рис. 4 видно, что измеренный доплеровский спектр остаётся достаточно симметричным во всём интервале углов падения, за исключением значения  $27,4^\circ$ , но оказывается более узким по сравнению с гауссовым спектром. Коэффициент эксцесса принимает большие значения при малых углах падения, что отличает его от доплеровского спектра, измеренного на морской океанографической платформе (Чёрное море). Для морского волнения коэффициенты эксцесса и асимметрии медленно росли с увеличением угла падения (Караев и др., 2019б, 2020). Возможно, что наблюдаемое расхождение поведения коэффициента эксцесса с измерениями на океанографической платформе связано с влиянием течения на функцию распределения уклонов и их корреляцию с орбитальными скоростями.

Наблюдаемый разброс коэффициента эксцесса при угле падения  $12,4^\circ$  связан с тем, что измерения проводились два раза: в начале эксперимента и в конце (прошло больше часа). За это время ветро-волновая обстановка достаточно сильно изменилась. В дальнейшем мы сравним форму модельного и измеренного доплеровских спектров.

Формула (1) описывает связь двух определений ширины доплеровского спектра, и на рис. 5 (см. с. 219) приведена зависимость отношения  $\Delta F_{42}/\Delta F$  от угла падения (см. рис. 5а) и от коэффициента эксцесса (см. рис. 4б). Наблюдается значительное расхождение модели (формула (1)) и эксперимента (см. рис. 5а). При угле падения  $12,4^\circ$  отмечается большой разброс

значений, что объясняется изменением ветро-волновой обстановки между первой и второй серией измерений для угла  $12,4^\circ$ .

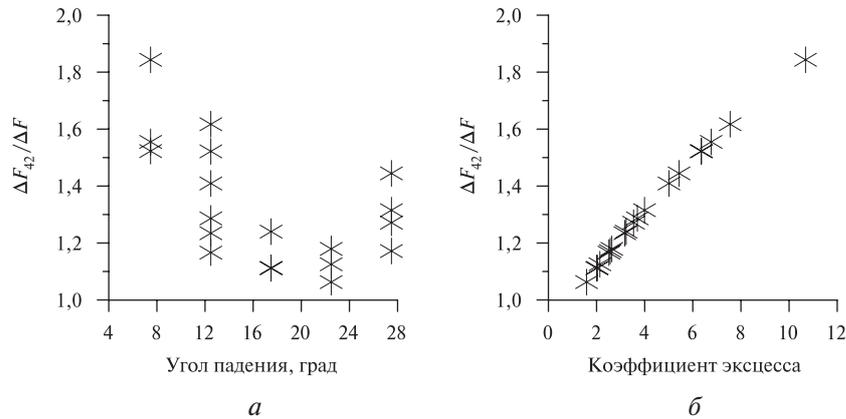


Рис. 5. Зависимость отношения ширины доплеровского спектра  $\Delta F_{42}/\Delta F$  от угла падения (а) и от коэффициента эксцесса (б)

### Доплеровский спектр при малых углах падения: эксперимент

Исследования обратного рассеяния при малых углах падения показали, что при углах падения меньше  $12^\circ$  доминирующим становится квазизеркальный механизм обратного рассеяния (Chu et al., 2012; Freilich, Vanhoff, 2003; Karaev et al., 2016; Panfilova et al., 2018). В ходе дальнейшего анализа будем проводить сравнение с квазизеркальной моделью обратного рассеяния, поэтому используем измерения при углах падения  $7,4$  и  $12,4^\circ$ .

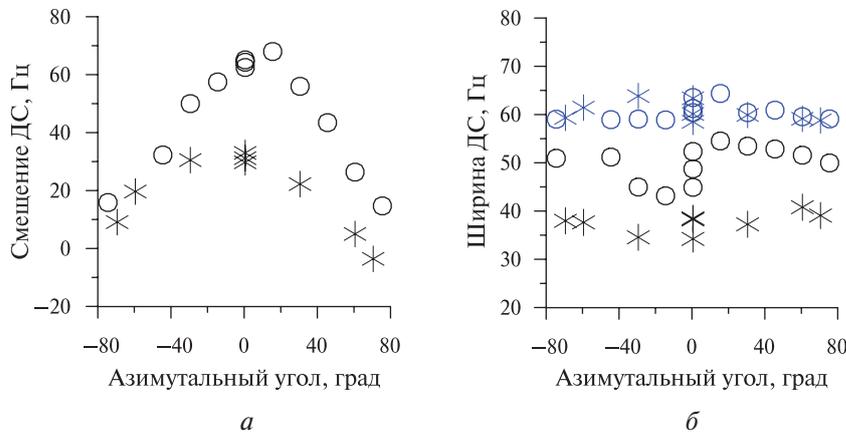


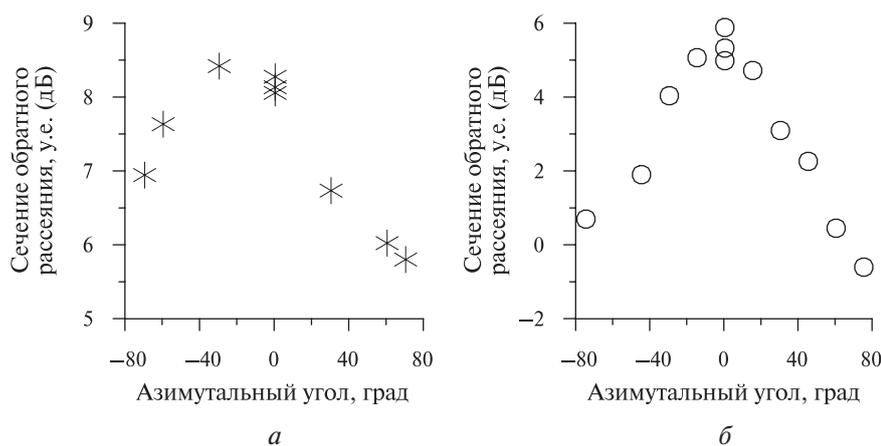
Рис. 6. Азимутальная зависимость смещения (а) и ширины (б) доплеровского спектра. Звёздочки — угол падения  $7,4^\circ$ , кружки —  $12,4^\circ$ . Символами чёрного цвета показана ширина  $\Delta F$ , синим цветом —  $\Delta F_{42}$

На рис. 6 показана зависимость смещения (см. рис. 6а) и ширины (см. рис. 6б) доплеровского спектра от направления зондирования (азимутального угла). Звёздочками и кружками показаны азимутальные зависимости смещения доплеровского спектра для углов падения  $7,4$  и  $12,4^\circ$  соответственно (см. рис. 6а). Азимутальные зависимости ширины доплеровского спектра  $\Delta F$  отмечены звёздочками и кружками чёрного цвета для углов падения  $7,4$  и  $12,4^\circ$ , а синим цветом показаны зависимости для ширины  $\Delta F_{42}$  (см. рис. 6б).

По смещению доплеровского спектра видно, что за время между сеансами измерений произошло небольшое изменение направления распространения волнения и при  $70^\circ$  смещение доплеровского спектра перестало быть отрицательным.

Интересный результат получен для двух определений ширины доплеровского спектра. Оказалось, что ширина доплеровского спектра  $\Delta F_{42}$  значительно стабильнее, чем  $\Delta F$ , и для трёх измерений (два сеанса для  $12,4^\circ$  и один сеанс для  $7,4^\circ$ ) практически не зависела от направления зондирования. Для оценки перспектив применения ширины  $\Delta F_{42}$  при определении параметров волнения требуются дополнительные исследования.

Ещё одной измеряемой характеристикой стало сечение обратного рассеяния. Радиолокатор не калиброван, и в ходе измерений изменяли коэффициент усиления приёмного тракта, поэтому абсолютные значения сечений обратного рассеяния, полученные при разных углах падения, нельзя сравнивать, а надо анализировать вид азимутальной зависимости. На *рис. 7* приведены азимутальные зависимости сечения обратного рассеяния для углов падения  $7,4^\circ$  (см. *рис. 7а*) и  $12,4^\circ$  (см. *рис. 7б*).



*Рис. 7.* Азимутальная зависимость сечения обратного рассеяния для угла падения  $7,4^\circ$  (*а*) и  $12,4^\circ$  (*б*)

Из *рис. 7* видно, что по азимутальным зависимостям смещения доплеровского спектра и сечения обратного рассеяния можно определить направление распространения волнения. Однако оценка скорости течения возможна только по смещению доплеровского спектра (см., например, работы (Fang et al., 2017; Romeiser et al., 2005; Torokov et al., 2011)).

### Доплеровский спектр при малых углах падения: теория

Модель доплеровского спектра приведена в работах (Караев и др., 2019а, б, 2020) и применение её для вычисления доплеровского спектра на реке обсуждалось в публикациях (Рябкова и др., 2019, 2020), поэтому здесь приведём только результаты моделирования для условий эксперимента. Рассмотрим решение прямой задачи, т.е. используя информацию о скорости и направлении ветра, длине ветрового разгона, скорости и направлении течения, направлении зондирования и угле падения вычислим доплеровский спектр по теоретической модели и сравним с измеренным.

Как видно из *рис. 2*, скорость ветра в основном находилась в интервале  $5-7,5$  м/с. Максимальная длина разгона была меньше 4 км при направлении ветра  $180^\circ$ , однако направление ветра менялось в основном в интервале  $180-195^\circ$ , что влияло на фактическую длину ветрового разгона, уменьшая её.

К сожалению, для используемой модели спектра волнения (Ryabkova, Karaev, 2018; Ryabkova et al., 2019) существует ограничение минимальной величины безразмерного ветрового разгона, равное 1430, что обусловлено отсутствием необходимых экспериментальных данных для меньших его значений. В морских условиях с такой проблемой не сталкивались, а для реки необходимо это учитывать. В дальнейшем планируется развитие модели спектра волнения, которое позволит снять данное ограничение.

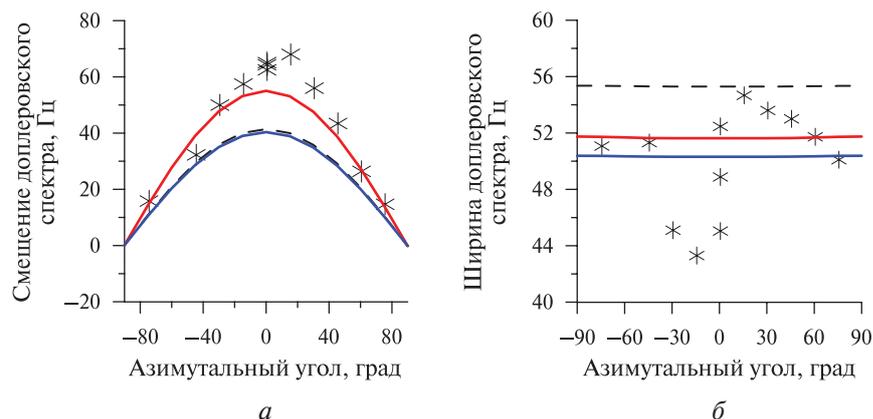
С учётом существующих ограничений модели спектра волнения на длину ветрового разгона был выбран минимальный разгон ( $\tilde{x} = 1430$ ) и соответствующая ему скорость приводного ветра 5 м/с ( $x = 3644$  м). Измеренная по видеозаписи скорость течения составляла около 0,35 м/с. Для движущегося объекта при угле падения  $12,4^\circ$  доплеровский сдвиг будет равен 15,6 Гц, а при угле падения  $7,4^\circ - 9,3^\circ$  Гц.

В ходе дальнейшего анализа рассмотрим три варианта:

- 1) скорость ветра 5 м/с, направление ветра  $180^\circ$ , скорость течения 0,35 м/с, направление течения  $180^\circ$ ;
- 2) скорость ветра 5 м/с, направление ветра  $180^\circ$ , без течения;
- 3) скорость ветра 4,65 м/с, направление ветра  $180^\circ$ , без течения.

Во втором случае считаем, что на поверхности присутствует ветровое волнение, сформировавшееся при скорости ветра 5 м/с. В последнем случае полагаем, что скорость течения «уменьшила» скорость ветра относительно водной поверхности, но в явном виде скорость течения не используется, а на поверхности присутствует волнение, сформировавшееся при скорости ветра 4,65 м/с. Для сокращения записи будем обозначать варианты: 1В, 2В и 3В.

На *рис. 8* приведена азимутальная зависимость смещения (см. *рис. 8а*) и ширины (см. *рис. 8б*) доплеровского спектра для угла падения  $12,4^\circ$ . Звёздочками обозначены экспериментальные данные, модельные оценки показаны кривыми: красная — 1В, чёрная пунктирная — 2В и синяя — 3В.



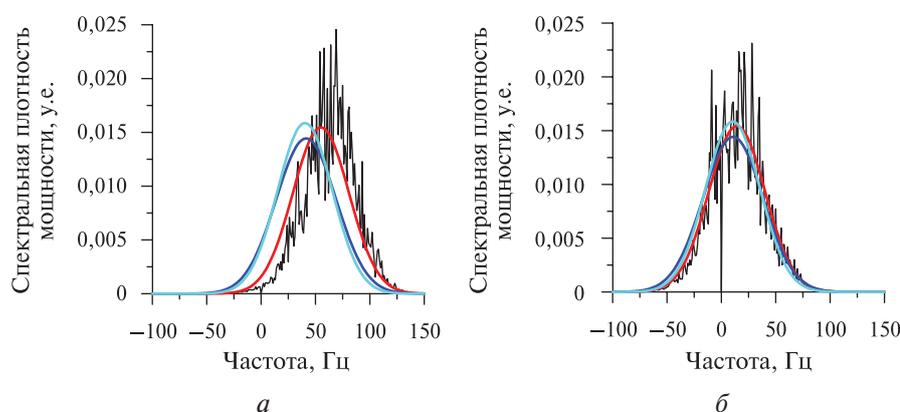
*Рис. 8.* Азимутальная зависимость смещения (*а*) и ширины  $\Delta F$  (*б*) доплеровского спектра. Звёздочки — эксперимент. Модельные данные: красная кривая — 1В, чёрный пунктир — 2В, синяя кривая — 3В. Угол падения —  $12,4^\circ$

Из *рис. 8* видно, что изменение скорости ветра (2В и 3В) не сильно влияет на смещение, но приводит к изменению ширины доплеровского спектра. При максимальных значениях азимутального угла (направления зондирования) смещение доплеровского спектра приближается к измеренному.

Наблюдаемые на *рис. 8* флуктуации ширины доплеровского спектра связаны с коротким временем усреднения/накопления, равным 1 мин. С увеличением времени усреднения флуктуации должны уменьшаться и оценка ширины станет более стабильной. Но увеличить время одного измерения на реке нельзя, так как тогда разброс будет связан с нестабильностью ветро-волновой обстановки за время всего эксперимента. При длине разгона менее 4 км изменение параметров волнения с изменением скорости ветра произойдёт быстро. Изменчивость скорости ветра видна на *рис. 2*.

Из *рис. 8а* видно, что измеренное смещение доплеровского спектра оказалось больше, чем предсказывает модель. Это указывает на то, что не все факторы, влияющие на характеристики отражённого сигнала, учтены в теоретической модели доплеровского спектра и исследования необходимо продолжить.

От сравнения интегральных характеристик перейдём к сравнению формы доплеровских спектров. На *рис. 9* приведены доплеровские спектры, измеренные при направлении зондирования  $0^\circ$  (см. *рис. 9а*) и  $75^\circ$  (см. *рис. 9б*) — чёрные кривые.



*Рис. 9.* Доплеровские спектры, измеренные при угле падения  $12,4^\circ$  и направлении зондирования  $0^\circ$  (*а*) и  $75^\circ$  (*б*). Модельные данные: красная кривая — 1В, синяя — 2В, голубая — 3В

Для удобства сравнения измеренные и модельные спектры были нормированы на мощность (интеграл по доплеровскому спектру). На *рис. 9* красная кривая — 1В, синяя — 2В и голубая — 3В. Из рисунка видно, при направлении зондирования  $75^\circ$  модельный доплеровский спектр хорошо описывает интервал частот доплеровского спектра (ширину) и смещение. Превышение амплитуды свидетельствует, что коэффициент эксцесса в эксперименте остаётся большим и спектр отличается от гауссового.

При зондировании навстречу течению ( $0^\circ$ ) наблюдается значительное превышение спектральной плотности мощности на «центральных» частотах, что приводит к большому значению коэффициента эксцесса. Такого не наблюдается в морских условиях (см. *рис. 4*).

Для удобства в *таблице* приведены численные оценки полученных результатов для рассмотренных выше вариантов по скорости ветра и скорости течения. Видно, что смещение доплеровского спектра больше, чем предсказывает модель для зондирования навстречу течению. При отклонении ( $75^\circ$ ) наблюдается хорошее совпадение модели и эксперимента.

#### Сравнение теории и эксперимента

Вариант	Скорость ветра, м/с	Скорость течения, м/с	Угол падения, град	Направление зондирования, град	Смещение доплеровского спектра, Гц	Отличие от эксперимента, Гц	Дополнительная горизонтальная скорость, м/с	
1В	5,00	0,35	12,4	0	55,03	9,28	0,21	
2В		0			41,42	22,89	0,52	
3В					4,65	40,34	23,97	0,54
1В	5,00	0,35		75	75	14,46	1,74	0,04
2В		0				10,90	5,30	0,12
3В						4,65	10,62	5,58

Из *рис. 9* видно, что увеличение смещения доплеровского спектра отражённого радиолокационного сигнала на течении происходит не за счёт появления «новых» частот в спектре (более быстрых рассеивателей), а за счёт увеличения мощности существующих рассеивателей.

Возможно, что это обусловлено следующими причинами. При наклонном зондировании основной вклад даёт отражение от переднего гребня волны, который имеет большую горизонтальную составляющую орбитальной скорости. С формальной точки зрения в модели

доплеровского спектра смещение зависит от коэффициента корреляции между уклонами и орбитальными скоростями. Моделирование показало, что в присутствии течения происходит увеличение коэффициента корреляции и, соответственно, увеличивается смещение доплеровского спектра.

Можно предложить следующую гипотезу для объяснения наблюдаемого эффекта. Если происходит обрушение, то отражающая площадка, расположенная на гребне волны, продолжает оставаться интенсивным рассеивателем, который обладает максимальной горизонтальной скоростью. Это приводит к росту мощности «центральных» компонент доплеровского спектра, но не к появлению быстрых рассеивателей, так как отражение от гребня волны происходило и до обрушения. Все «отражатели» существовали, но произошёл процесс «перераспределения» мощности между ними.

Таким образом, оба фактора связаны с тем, что происходит усиление отражения на участках волнового профиля, которые обладают максимальной горизонтальной составляющей орбитальной скорости, и это приводит к изменению формы доплеровского спектра и росту коэффициента эксцесса.

### Зависимость от угла падения

Измерения выполнялись в широком интервале углов падения, поэтому в заключение приведём сравнение оценок ширины и смещения доплеровского спектра с данными измерений во всём интервале углов падения.

На рис. 10 приведены зависимости смещения (см. рис. 10а) и ширины (см. рис. 10б) доплеровского спектра от угла падения. Измерения показаны звёздочками ( $f_{shift}$  и  $\Delta F$ ) и кружками ( $\Delta F_{42}$ ). Кривые на рисунке иллюстрируют вычисления по модели доплеровского спектра: красная кривая — 1В, чёрный пунктир — 2В и синяя кривая — 3В.

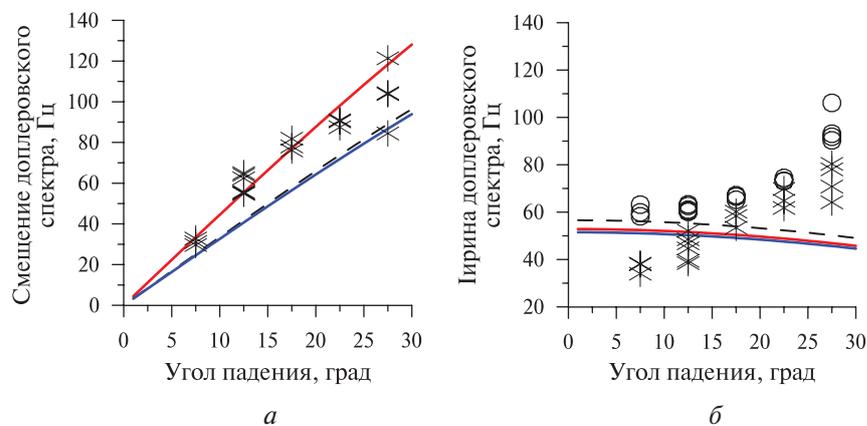


Рис. 10. Зависимость смещения (а) и ширины доплеровского спектра (б) от угла падения. Звёздочки —  $\Delta F$ , кружки —  $\Delta F_{42}$ . Красная кривая — 1В, синяя — 2В, голубая — 3В

Провал по ширине доплеровского спектра  $\Delta F$  при угле падения  $7,4^\circ$  связан с большим значением коэффициента эксцесса, что приводит к «зауживанию» доплеровского спектра по сравнению с гауссовым. В данном случае другое определение ширины доплеровского спектра ( $\Delta F_{42}$ ) становится более удобным, так как точнее характеризует волнение.

Рост ширины доплеровского спектра при увеличении угла падения связан с уменьшением интенсивности квазизеркального механизма обратного рассеяния и ростом вклада резонансного рассеяния, который оказывается более медленным.

Надо отметить, что точка со смещением больше 120 Гц при угле падения  $27,4^\circ$  не становится характерной, а обуславливается выбором слишком маленького коэффициента усиления приёмного тракта. В результате был измерен вклад квазизеркальной составляющей

(возможно, обрушения), а резонансное рассеяние ушло в шумы. Это проявилось в форме отражённого импульса (коэффициент асимметрии превысил 1). После увеличения коэффициента на 10 дБ смещение уменьшилось до 104 Гц, что лежит ниже красной кривой на *рис. 10*. Этот интересный приём может быть использован в будущих экспериментах для выделения квазизеркальной компоненты даже в присутствии интенсивного брэгговского рассеяния.

## Заключение

Проведены первые эксперименты по измерению спектральных и энергетических характеристик отражённого радиолокационного сигнала при углах падения меньше  $30^\circ$  в условиях речного течения. Получены зависимости ширины и смещения доплеровского спектра от угла падения и азимутального угла (направления зондирования).

Показано, что в отличие от морского волнения коэффициент эксцесса максимален при малых углах падения и уменьшается при увеличении угла падения. Это приводит к занижению смещения доплеровского спектра в модельных оценках по сравнению с экспериментом. Особенно чувствительной к величине коэффициента эксцесса оказывается ширина доплеровского спектра  $\Delta F$ . Минимизировать влияние формы отражённого доплеровского спектра позволяет другое определение ширины доплеровского спектра  $\Delta F_{42}$ .

Первые результаты обработки экспериментальных данных и сравнение с аналитическими моделями доплеровского спектра показали, что наличие течения может быть обнаружено при анализе азимутальных зависимостей ширины и смещения доплеровского спектра, однако для разработки алгоритма, позволяющего получить точные количественные оценки, необходимо продолжить обработку данных и провести измерения для других ветро-волновых условий и углов между направлением течения и направлением ветра.

Программы моделирования будут высланы заинтересованным читателям.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-05-00462а).

## Литература

1. *Караев В. Ю., Рябкова М. С., Панфилова М. А., Титченко Ю. А., Мешков Е. М.* (2019а) К вопросу об обратном рассеянии электромагнитных волн СВЧ-диапазона морской поверхностью при углах падения меньше 20 градусов // *Материалы Семнадцатой Всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»*. 11–15 нояб. 2019. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 275. DOI 10.21046/17DZZconf-2019a.
2. *Караев В. Ю., Титченко Ю. А., Мешков Е. М., Панфилова М. А., Рябкова М. С.* (2019б) Доплеровский спектр радиолокационного сигнала, отражённого морской поверхностью при малых углах падения // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 6. С. 221–234. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-221-234.
3. *Караев В. Ю., Панфилова М. А., Рябкова М. С., Титченко Ю. А., Мешков Е. М.* Доплеровский спектр радиолокационного сигнала, отражённого морской поверхностью при малых углах падения: эксперимент // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020. Т. 17. № 2. С. 149–161. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-149-161.
4. *Ламли Дж., Пановский Г.* Структура атмосферной турбулентности / пер. с англ. М.: Мир, 1966. 264 с.
5. *Рябкова М. С., Панфилова М. А., Караев В. Ю., Титченко Ю. А., Мешков Е. М., Зуйкова Э. М.* Экспериментальное исследование доплеровского спектра сигнала, отражённого взволнованной водной поверхностью при малых углах падения в присутствии постоянного течения // *Материалы Семнадцатой Всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»*. 11–15 нояб. 2019. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 326. DOI 10.21046/17DZZconf-2019a.
6. *Рябкова М. С., Караев В. Ю., Панфилова М. А., Титченко Ю. А., Мешков Е. М., Зуйкова Э. М.* К вопросу о влиянии речного течения на доплеровский спектр отражённого радиолокационного сигнала при малых углах падения // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020. (В печати.)

7. Chu X., He Y., Karaev V. Y., Chen G. Relationships between Ku-band radar backscatter and integrated wind and waves parameters at low incidence angles // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2012. V. 50. No. 11. P. 4599–4609. DOI: 10.1109/TGRS.2012.2191560.
8. Fang H., Xie T., Perrie W., Zhao L., Yang J., He Y. Ocean Wind and Current Retrievals Based on Satellite SAR Measurements in Conjunction with Buoy and HF Radar Data // Remote Sensing. 2017. V. 9. No. 12. Art. No. 1321. 13 p. URL: <https://doi.org/10.3390/rs9121321>.
9. Freilich M., Vanhoff B. A. The Relationship between Winds, Surface Roughness, and Radar Backscatter at Low Incidence Angles from TRMM Precipitation Radar Measurements // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2003. V. 20. No. 4. P. 549–562. URL: [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2003\)20<549:TRBWSR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2003)20<549:TRBWSR>2.0.CO;2).
10. Karaev V., Panfilova M., Titchenko Y., Meshkov E., Balandina G. Preliminary results of the retrieval of the mean square slopes of the large-scale sea waves by the dual-frequency precipitation radar // Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. Beijing, China. 2016. P. 4772–4775.
11. Masuko H., Okamoto K., Shimada M., Niwa S. Measurement of Microwave backscattering signatures of the ocean surface using X band and Ka band airborne scatterometers // J. Geophysical Research. 1986. V. 91. No. C11. P. 13065–13083. URL: <https://doi.org/10.1029/JC091iC11p13065>.
12. Panfilova M. A., Karaev V. Y., Guo J. Oil slick observation at low incidence angles in Ku-band // J. Geophysical Research: Oceans. V. 123. 2018. P. 1924–1936. URL: <https://doi.org/10.1002/2017JC013377>.
13. Panfilova M., Ryabkova M., Karaev V., Skiba E. Retrieval of the statistical characteristics of wind waves from the width and shift of the Doppler spectrum of the backscattered microwave signal at low incidence angles // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2020. V. 20. No. 3. P. 2225–2231. DOI: 10.1109/TGRS.2019.2955546.
14. Romeiser R., Breit H., Eineder M., Runge H., Flamen P. Current measurements by sar along-track interferometry from a space shuttle // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2005. No. 10. P. 2315–2324. DOI: 10.1109/TGRS.2005.856116.
15. Ryabkova M., Karaev V. A modified wave spectrum for modeling in remote sensing problems // Proc. IGARSS. 2018. P. 3274–3277. DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8518285.
16. Ryabkova M., Karaev V., Guo J., Titchenko Yu. A review of wave spectra models as applied to the problem of radar probing of the sea surface // J. Geophysical Research: Oceans. 2019. V. 124. Iss. 10. P. 7104–7134. URL: <https://doi.org/10.1029/2018JC014804>.
17. Toporkov J. V., Hwang P. A., Sletten M. A., Frasier S. J. Surface Velocity Profiles in a Vessel's Turbulent Wake Observed by a Dual-Beam Along-Track Interferometric SAR // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2011. V. 8. No. 4. P. 606–606. DOI: 10.1109/LGRS.2010.2096457.

## Doppler spectrum of backscattered microwave signal: experiment at the river

**M. S. Ryabkova, V. Yu. Karaev, M. A. Panfilova,  
Yu. A. Titchenko, E. M. Meshkov, E. M. Zuikova**

*Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod 603950, Russia  
E-mail: [mrjabkova@gmail.com](mailto:mrjabkova@gmail.com)*

The Doppler spectrum was measured at incidence angles of less than 30° in the presence of a stationary river current. To describe the Doppler spectrum, in addition to the traditionally used width and shift, skewness and kurtosis coefficients were used, as well as the width of the Doppler spectrum, calculated through 4 and 2 central moments. Data processing showed that, unlike sea waves, the kurtosis coefficient is maximum at small incidence angles and decreases with increasing incidence angle. The dependences of the width and shift of the Doppler spectrum, the backscattering radar cross section, the skewness and kurtosis coefficients on the incidence angle and the direction of radar probing (azimuth angle) were calculated. To calculate the Doppler spectrum of the reflected signal according to the theoretical model, information is required on the statistical characteristics of the waves, which are found on the wave spectrum. Surface waves were modeled taking into account the speed and direction of the river current. A comparison of model estimates and experimental results showed that taking into account the river current in the wave spectrum can significantly improve the agreement between theory

and experiment. The observed underestimation of the shift of the model Doppler spectrum in comparison with the experimental data in case of the upwind direction requires further research.

**Keywords:** velocity and direction of river current, width and shift of the Doppler spectrum, Kirchhoff approximation, small incidence angles, developing wind waves, skewness and kurtosis coefficients

Accepted: 14.09.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-213-227

## References

1. Karaev V. Yu., Ryabkova M. S., Panfilova M. A., Titchenko Yu. A., Meshkov E. M. (2019a), K voprosu ob obratnom rasseyanii elektromagnitnykh voln SVCh-diapazona morskoi poverkhnost'yu pri uglakh padeniya men'she 20 gradusov (On the question of backscattering of electromagnetic waves of the microwave range by the sea surface at angles of incidence of less than 20 degrees), *Materialy Semnadsatoi Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 17<sup>th</sup> Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), 11–15 Nov. 2019, Moscow: IKI RAN, 2019, p. 275, DOI 10.21046/17DZZconf-2019a.
2. Karaev V. Yu., Titchenko Yu. A., Meshkov E. M., Panfilova M. A., Ryabkova M. S. (2019b), Doplerovskii spektr radiolokatsionnogo signala, otrazhennogo morskoi poverkhnost'yu pri malykh uglakh padeniya (Doppler spectrum of microwave signal backscattered by sea surface at small incidence angles), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 221–234, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-221-234.
3. Karaev V. Yu., Panfilova M. A., Ryabkova M. S., Titchenko Yu. A., Meshkov E. M., Doplerovskii spektr radiolokatsionnogo signala, otrazhennogo morskoi poverkhnost'yu pri malykh uglakh padeniya: eksperiment (Doppler spectrum of microwave signal backscattered by sea surface at small incidence angles: experiment), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 2, pp. 149–161, DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-149-161.
4. Lamli J., Panovskii G., *Struktura atmosfernoii turbulentnosti* (The structure of atmospheric turbulence), Moscow: Mir, 1966, 264 p.
5. Ryabkova M. S., Panfilova M. S., Karaev V. Yu., Titchenko Yu. A., Meshkov E. M., Zuikova E. M., Eksperimental'noe issledovanie doplerovskogo spektra signala, otrazhennogo vzvolnovannoi vodnoi poverkhnost'yu pri malykh uglakh padeniya v prisutstvii postoyannogo techeniya (An experimental study of the Doppler spectrum of a microwave signal backscattered by a water surface at small incidence angles in the presence of a stationary current), *Materialy Semnadsatoi Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 17<sup>th</sup> Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), 11–15 Nov. 2019, Moscow: IKI RAN, 2019, p. 326, DOI: 10.21046/17DZZconf-2019a.
6. Ryabkova M. S., Karaev V. Yu., Panfilova M. S., Titchenko Yu. A., Meshkov E. M., Zuikova E. M., K voprosu o vliyanii rechnogo techeniya na doplerovskii spektr otrazhennogo radiolokatsionnogo signala pri malykh uglakh padeniya (On the problem of the river flow influence on the Doppler spectrum of the reflected radar signal at small incidence angles), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020. (In press.)
7. Chu X., He Y., Karaev V. Y., Chen G., Relationships between Ku-band radar backscatter and integrated wind and waves parameters at low incidence angles, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2012, Vol. 50, No. 11, pp. 4599–4609, DOI: 10.1109/TGRS.2012.2191560.
8. Fang H., Xie T., Perrie W., Zhao L., Yang J., He Y., Ocean Wind and Current Retrievals Based on Satellite SAR Measurements in Conjunction with Buoy and HF Radar Data, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, No. 12, Art. No. 1321, 13 p., available at: <https://doi.org/10.3390/rs9121321>.
9. Freilich M., Vanhoff B. A., The Relationship between Winds, Surface Roughness, and Radar Backscatter at Low Incidence Angles from TRMM Precipitation Radar Measurements, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, Vol. 20, No. 4, pp. 549–562, available at: [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2003\)20<549:TRBWSR>2.0.CO;2/](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2003)20<549:TRBWSR>2.0.CO;2/).
10. Karaev V., Panfilova M., Titchenko Y., Meshkov E., Balandina G., Preliminary results of the retrieval of the mean square slopes of the large-scale sea waves by the dual-frequency precipitation radar, *Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, Beijing, China, 2016, pp. 4772–4775.
11. Masuko H., Okamoto K., Shimada M., Niwa S., Measurement of Microwave backscattering signatures of the ocean surface using X band and Ka band airborne scatterometers, *J. Geophysical Research*, 1986, Vol. 91, No. C11, pp. 13065–13083, available at: <https://doi.org/10.1029/JC091iC11p13065>.

12. Panfilova M. A., Karaev V. Y., Guo J., Oil slick observation at low incidence angles in Ku-band, *J. Geophysical Research: Oceans*, Vol. 123, 2018, pp. 1924–1936, available at: <https://doi.org/10.1002/2017JC013377>.
13. Panfilova M., Ryabkova M., Karaev V., Skiba E., Retrieval of the statistical characteristics of wind waves from the width and shift of the Doppler spectrum of the backscattered microwave signal at low incidence angles, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2020, Vol. 20, No. 3, pp. 2225–2231, DOI: 10.1109/TGRS.2019.2955546.
14. Romeiser R., Breit H., Eineder M., Runge H., Flament P., Current measurements by sar along-track interferometry from a space shuttle, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2005, No. 10, pp. 2315–2324, DOI: 10.1109/TGRS.2005.856116.
15. Ryabkova M., Karaev V., A modified wave spectrum for modeling in remote sensing problems, *Proc. IGARSS*, 2018, pp. 3274–3277, DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8518285.
16. Ryabkova M., Karaev V., Guo J., Titchenko Yu., A review of wave spectra models as applied to the problem of radar probing of the sea surface, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2019, Vol. 124, Issue 10, pp. 7104–7134, available at: <https://doi.org/10.1029/2018JC014804>.
17. Toporkov J. V., Hwang P. A., Sletten M. A., Frasier S. J., Surface Velocity Profiles in a Vessel's Turbulent Wake Observed by a Dual-Beam Along-Track Interferometric SAR, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, Vol. 8, No. 4, pp. 606–606, DOI: 10.1109/LGRS.2010.2096457.