

# Методика дистанционного определения характеристик ветрового волнения: 2. Алгоритм восстановления параметров спектра ГКВ

И.Н. Садовский<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН  
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

E-mail: [ilya\\_sadovsky@iki.rssi.ru](mailto:ilya_sadovsky@iki.rssi.ru)

<sup>2</sup>Владимирский Государственный Университет  
600026, Владимир, ул. Горького, 87

E-mail: [ilya\\_nik\\_sad@mail.ru](mailto:ilya_nik_sad@mail.ru)

Серия работ «Методика дистанционного определения характеристик ветрового волнения» посвящена вопросу создания методики нелинейной радиотепловой резонансной спектроскопии (НРРС). НРРС разрабатывается с целью дистанционного определения характеристик спектра гравитационно-капиллярных волн (ГКВ) на основе данных угловых радиополяриметрических измерений. В работах данной серии изложены теоретические основы используемого метода (предложенного Ю.Г.Трохимовским в 1997), особенности его программной и аппаратной реализации, представлен алгоритм проведения радиополяриметрических измерений, результаты апробации методики в рамках международного натурального эксперимента «САРМОС'05», сравнения полученных результатов как с существующими моделями ветрового волнения, так и с данными контактных измерений, выполненных посредством струнного волнографа.

В настоящей работе приводится алгоритм восстановления параметров спектра ГКВ, использующий данные радиополяриметрических измерений на различных углах и не требующий каких-либо априорных предположений о форме спектра ГКВ. Основой метода является представление морского волнения в виде композиции крупных волн зыби и распределенных по их поверхности более коротких ГКВ. В данной постановке определение величины приращения радиояркой температуры взволнованной поверхности осуществляется путем интегрирования вклада крупных и коротких волн. Расчет влияния крупномасштабных и мелкомасштабных (относительно рабочей длины волны радиометра) компонент волнения на регистрируемую радиояркую температуру осуществляется по методу Кирхгофа и в соответствии с теорией «критических явлений» в приближении метода малых возмущений.

На примере модельных расчетов показано, что разработанный алгоритм, в отсутствие влияния вариаций входных данных, позволяет восстанавливать спектр кривизны  $B(K)$ , функцию дисперсии уклонов волн  $\sigma^2(K)$  и значение дисперсии уклонов крупных волн  $\sigma_0^2$  с ошибкой, не более 7,0%, 1,0% и 15,0% соответственно.

## Оценка величины радиояркого контраста взволнованной морской поверхности

Расчет радиоярких контрастов  $\Delta T_{Я}(\theta)$ , определяемых как разность радиояркой температуры взволнованной и гладкой водной поверхности при фиксированных значениях температуры, солености и состояния атмосферы, производился с учетом вклада всего спектра поверхностных волн, пены и модуляции переотраженного излучения атмосферы. Подробное описание используемой модели может быть найдено в первой работе данной серии: «Методика дистанционного определения характеристик ветрового волнения: 1. Расчет радиоярких контрастов взволнованной водной поверхности».

В соответствии с используемой моделью излучения, радиояркий контраст взволнованной водной поверхности, обусловленный присутствием волн различных масштабов, равен:

$$\Delta T_{Я} = \Delta T_{Я\_ДЛ} + \Delta T_{Я\_КОР}, \quad (1)$$

где  $\Delta T_{Я\_ДЛ}$  и  $\Delta T_{Я\_КОР}$  - вклад длинноволновых и коротковолновых компонент волнения.

При этом, как это было показано в [1], значение дисперсии уклонов крупных волн  $\sigma_0^2$  является, по сути, единственным параметром, влияющим на регистрируемые значения  $\Delta T_{Я\_ДЛ}$ . Дру-

гими словами:  $\Delta T_{Я\_дл} = f_1(\sigma_0^2)$ , где  $f_1(\sigma_0^2)$  - функция, конкретный вид которой представлен в [2].

Радиояркий контраст мелкомасштабных компонент, в соответствии с [1], определяется интегрированием вклада отдельных гармоник, которые, в общем случае, имеют произвольную амплитуду и ориентацию относительно плоскости зондирования. Тогда, на основании полученных в [2] соотношений, можно записать:  $\Delta T_{Я\_кор} = f_2(S(K, \varphi))$ , т.е. вклад коротковолновых компонент известен, если известен пространственный спектр возвышений.

С учетом вышесказанного, для итогового значения радиояркого контраста взволнованной водной поверхности запишем:

$$\Delta T_{Я} = \Delta T_{Я\_дл} + \Delta T_{Я\_кор} = f_1(\sigma_0^2) + f_2(S(K, \varphi)).$$

### Алгоритм решения задачи восстановления параметров спектра

Наличие резонансов в тепловом излучении [3] обеспечивает уникальную возможность восстановления двумерного пространственного спектра в гравитационно-капиллярной области по поляризационным измерениям на различных углах наблюдения. Как было показано в [4], для радиометрических измерений в коротком сантиметровом и миллиметровом диапазонах спектр волнения восстанавливается в волновом интервале  $[K_{МИН}, K_{МАКС}]$ , где  $K_{МИН} = 0,05 k_{0МИН}$ , а  $K_{МАКС} = 2,0 k_{0МАКС} \cdot k_{0МИН}$  и  $k_{0МАКС}$  суть минимальное и максимальное волновое число ( $k_0$ ) принимаемого излучения для всего набора радиометрических каналов. Представленные в настоящей работе данные модельных расчетов получены в приближении о наличии данных измерений радиоярких контрастов водной поверхности тремя радиометрическими приемниками с рабочими длинами волн  $\lambda = 0,3$  см, 0,8 см и 8,0 см. Таким образом, диапазон исследуемых волновых чисел был ограничен  $[0,039; 41,88]$  рад/см. Или, в терминах длин волн поверхностного волнения, -  $[0,149; 161,02]$  см.

Формат работы, в силу ограниченного объема, не позволяет представить детальное описание каждого шага разработанного алгоритма, как это сделано в [2, 5]. Поэтому, следует ограничиться перечислением ключевых моментов, позволяющих реализовать поиск решения обратной задачи.

На первом шаге рассматриваемый интервал волновых чисел разбивается на  $M$  (в нашем случае  $M=6$ ) подынтервалов с граничными волновыми числами  $[K_j, K_{j+1}]$ ,  $j = 1, M$ . Разбиение выполняется псевдослучайным образом относительно фиксированных опорных значений  $K_j$ , делящих рассматриваемый интервал на равные части в логарифмическом масштабе. При разбиении спектр кривизны (знание формы которого необходимо для вычисления  $\Delta T_{Я\_кор}$ ) аппроксимируется кусочно-линейной функцией посредством случайного выбора значений  $B(K)$  на границах каждого из 6-и подынтервалов. Внутри каждого подынтервала  $[K_j, K_{j+1}]$  рассчитываются значения коэффициентов аппроксимирующей функции  $B(K) = a_j \cdot \log(K) + b_j$ . Пример разбиения волнового интервала и кусочно-линейная аппроксимация  $B(K)$  представлены на рис. 1.

Значение дисперсии уклонов (используемое в расчете  $\Delta T_{Я\_дл}$ ) для данной длины волны  $i$ -го радиометра с учетом представленной аппроксимации  $B(K)$  может быть определено посредством выражения:

$$\sigma_{0i}^2 = \sigma_0^2 + 2\pi \sum_{j=1, m-1}^{K_{j+1}} \int_{K_j} K^{-1} (a_j \cdot \log(K) + b_j) dK + 2\pi \int_{K_m}^{K_{МИН}^i} K^{-1} (a_m \cdot \log(K) + b_m) dK \quad (3)$$

где значение индекса  $m$  определяется из условия:  $K_m < K_{МИН}^i \leq K_{m+1}$ ,  $K_{МИН}^i = 0,05 k_0^i$ ;  $\sigma_0^2$  - дисперсия уклонов крупных волн, для которых верно  $K < K_{МИН}$ .

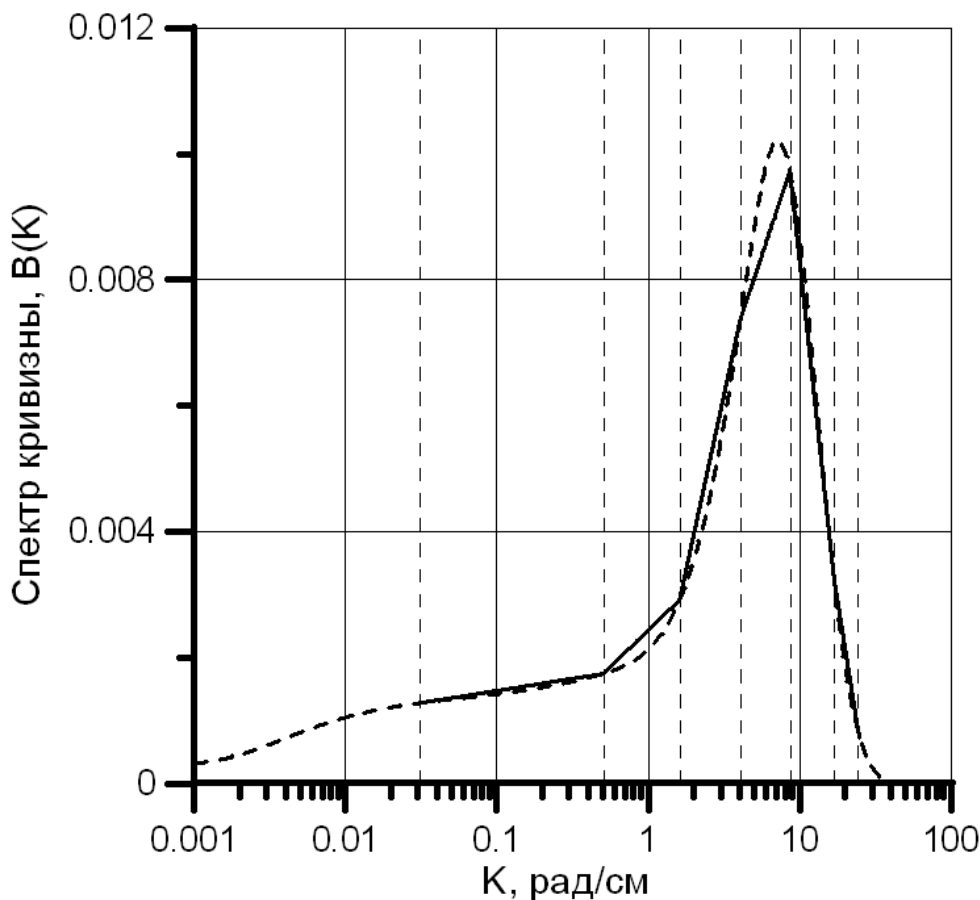


Рис. 1. Спектр кривизны  $B(K)$ , построенный по данным работы [6] для скорости ветра 8,0 м/с (черная пунктирная линия) и его аппроксимация в соответствии с представленной методикой (черная сплошная линия). Вертикальные пунктирные линии соответствуют границам подынтервалов одного из разбиений

Результаты работы [2] позволяют представить зависимость радиояркости от дисперсии уклонов крупных волн в виде следующей аппроксимации:

$$\Delta T_{Я\_ДЛ}^i = f(\sigma_{0i}^2) = c_0 + c_1 \cdot (\sigma_{0i}^2) + c_2 \cdot (\sigma_{0i}^2)^2 + c_3 \cdot (\sigma_{0i}^2)^3 + c_4 \cdot (\sigma_{0i}^2)^4 + c_5 \cdot (\sigma_{0i}^2)^5 \quad (4)$$

где коэффициенты  $c_0 - c_5$  могут быть найдены в соответствии с соотношениями из [2].

Представленные выражения, в совокупности с соотношениями (1) и (2), позволяют рассчитать значение радиояростного контраста всей совокупности волновых компонент:

$$\begin{aligned} \Delta T_{Я}^i &= \Delta T_{Я\_ДЛ}^i + \Delta T_{Я\_КОР}^i = \\ & \sum_{n=0}^5 c_n \cdot \left( \sigma_0^2 + 2\pi \sum_{j=1, m-1}^{K_{j+1}} \int_{K_j}^{K_{j+1}} K^{-1} (a_j \cdot \log(K) + b_j) dK + 2\pi \int_{K_m}^{K_{МИН}^i} K^{-1} (a_m \cdot \log(K) + b_m) dK \right)^n + \\ & 2\pi \int_{K_{МИН}^i}^{K_m} (a_m \cdot \log(K) + b_m) D^i(K) K dK + 2\pi \sum_{j=m+1, M-1}^{K_{j+1}} \int_{K_j}^{K_{j+1}} (a_j \cdot \log(K) + b_j) D^i(K) K dK + \\ & 2\pi \int_{K_m}^{K_{МАКС}^i} (a_m \cdot \log(K) + b_m) D^i(K) K dK \end{aligned} \quad (5)$$

где индекс  $i$  означает различные длины волн, поляризацию или угол измерения. Следует отметить, что более узкое применение данного индекса в выражении (3) не вступает в противоречие с записью в (4) и (5) если принять, что для всех углов наблюдения и поляризаций, относящихся к выделенному радиометру,  $\sigma_{0i}^2$  и  $K_{МИН}^i$  остаются постоянными.

Подобное представление позволяет путем подбора формы спектра кривизны в исследуемом волновом интервале (которая задается значениями функции  $B(K)$  на границах подынтервалов разбиения  $[K_j, K_{j+1}]$ ) и значения  $\sigma_0^2$  осуществлять решение обратной задачи. Для этого, на каждом шаге подбора  $B(K)$  и  $\sigma_0^2$ , вычисляется значение функции невязки:

$$\varepsilon = \sum_i \left| \Delta T_{Я}^i - \Delta T_{Я\_ЭКСП}^i \right|$$

где  $\Delta T_{Я\_ЭКСП}^i$  - экспериментально измеренные значения радиоярких контрастов, являющиеся входными данными при решении задачи восстановления параметров спектра. В качестве иллюстрации подобной операции представлен (рис. 2) вариант «плохого» решения задачи минимизации функции невязки ( $\varepsilon > 13$  К). Из графика видно, что расчетные значения ярких контрастов  $\Delta T_{Я}$ , рассчитанные по выбранным  $B(K)$  и  $\sigma_0^2$ , не обеспечивают необходимого ( $\varepsilon < 1,5$  К) совпадения с входными данными  $\Delta T_{Я\_ЭКСП}$  и, соответственно, не являются решением задачи.

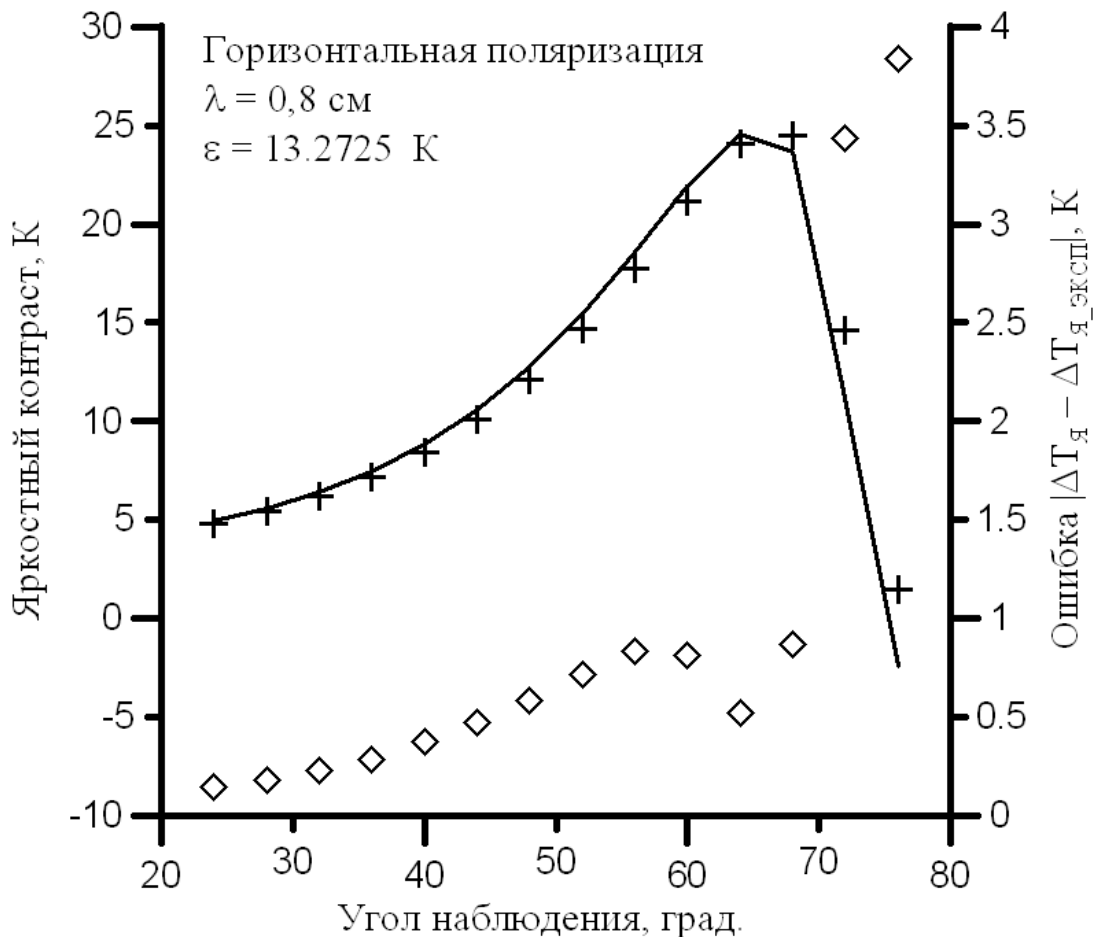


Рис. 2. Сравнение модельных значений  $\Delta T_{Я\_ЭКСП}$  с результатами решения прямой задачи (определения яркостных контрастов  $\Delta T_{Я}$ ) относительно выбранных  $B(K)$  и  $\sigma_0^2$ . Сплошная линия -  $\Delta T_{Я\_ЭКСП}$ , крестики -  $\Delta T_{Я}$ , ромбы - модуль функции ошибки

В упрощенном виде, схема разработанного алгоритма представлена на рис.3.

При нахождении минимума функции невязки выполнялось  $1,0 \cdot 10^4$  итераций, хотя в большинстве случаев, удовлетворительное (ошибка определения параметров спектра не более 10%) решение находилось при значениях счетчика менее 800. Такой запас по количеству итераций является необходимым при наличии во входных данных ошибок различного характера. Генерация новых значений  $B(K)$  и  $\sigma_0^2$  для каждой итерация осуществлялась псевдослучайным методом. При этом вновь сгенерированные значения отбрасывались в случае увеличения  $\varepsilon$  по сравнению с предыдущей итерацией.

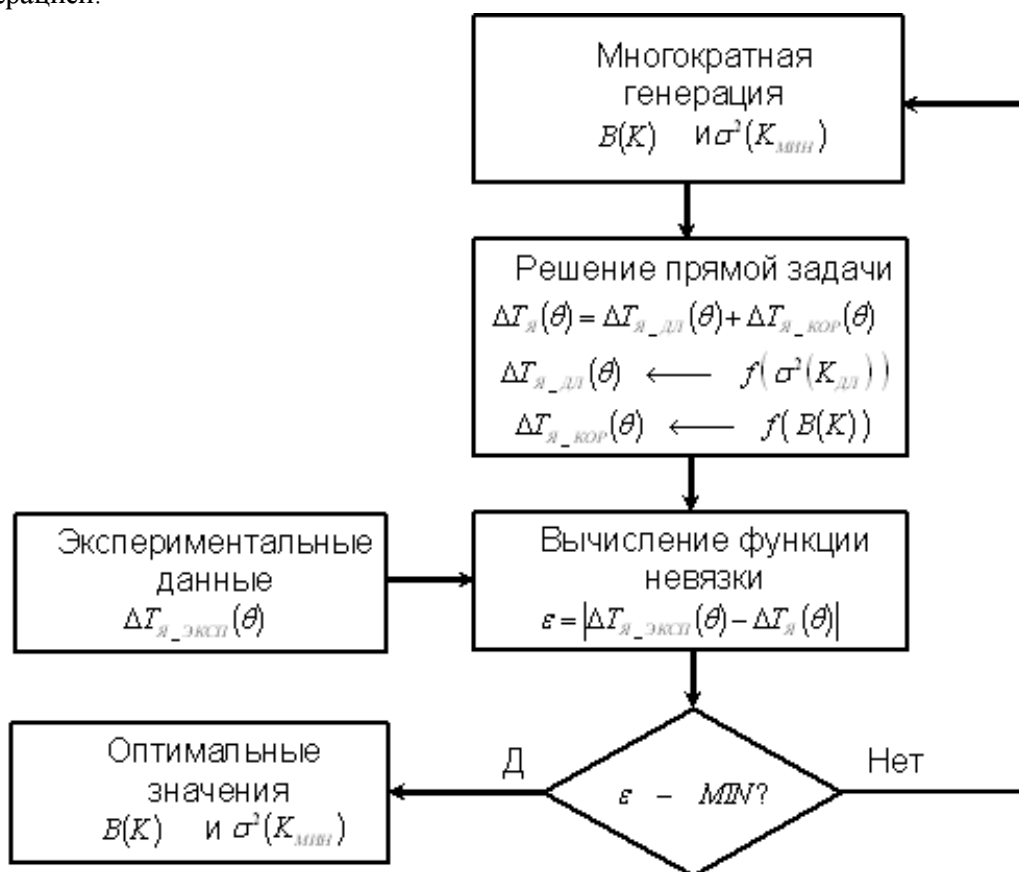


Рис. 3. Алгоритм восстановления параметров спектра

Следует отметить, что кусочно-линейная аппроксимация, для 6 подынтервалов разбиения, не обеспечивает априорную гладкость искомой функции  $B(K)$ . Разработанная методика восстановления параметров спектра ГКВ предполагает нахождение оптимальных решений для различных вариантов (порядка 200) разбиения исследуемого интервала волновых чисел. При этом окончательное решение, полученное в результате усреднения всех вариантов, удовлетворяет как условию минимизации функции невязки, так и условию гладкости  $B(K)$ .

### Результат восстановления параметров спектра с использованием разработанной методики

Проверка методики осуществлялась на основе модельных расчетов. Для этого по известным значениям  $B(K)$  и  $\sigma_0^2$  (модель волнения [6] для скорости ветра 8,0 м/с) осуществлялся расчет радиояркостных контрастов водной поверхности для всего набора имеющихся радиометрических каналов (модель радиотеплового излучения [1]). Далее, полученные значения  $\Delta T_\gamma$  для различных

углов использовались в качестве входных данных при решении задачи восстановления параметров спектра.

Найденные в ходе решения обратной задачи значения дисперсии уклонов крупных волн, а также зависимостей  $B(K)$  и  $\sigma^2(K)$  (то же, что и  $\sigma_0^2$ , но для скользящего  $K$ ) оценивались по степени их близости к модельным результатам:

$$\Delta B(K) = \frac{\int_{K_{MIN}}^{K_{MAX}} |B_{МОД}(K) - B_{ОЗ}(K)| dK}{\int_{K_{MIN}}^{K_{MAX}} B_{МОД}(K) dK} \cdot 100\%, \quad \Delta \sigma^2(K) = \frac{\int_{K_{MIN}}^{K_{MAX}} |\sigma_{МОД}^2(K) - \sigma_{ОЗ}^2(K)| dK}{\int_{K_{MIN}}^{K_{MAX}} \sigma_{МОД}^2(K) dK} \cdot 100\% \text{ и}$$

$$\Delta \sigma_0^2 = \frac{\sigma_{0МОД}^2 - \sigma_{0ОЗ}^2}{\sigma_{0МОД}^2} \cdot 100\%,$$

где  $B_{МОД}(K)$ ,  $\sigma_{МОД}^2(K)$  и  $\sigma_{0МОД}^2$  - опорные значения спектра кривизны, функции дисперсии уклонов и дисперсии уклонов крупных волн;  $B_{ОЗ}(K)$ ,  $\sigma_{ОЗ}^2(K)$  и  $\sigma_{0ОЗ}^2$  - значения, найденные с использованием разработанной методики.

В графическом виде, результат восстановления  $B_{ОЗ}(K)$  и  $\sigma_{ОЗ}^2(K)$  приведены на рис.4. Отметим, что в 98% случаев, ошибка восстановления величин  $B(K)$ ,  $\sigma^2(K)$  и  $\sigma_0^2$  не превышает значений 7,0%, 1,0% и 14%, соответственно.

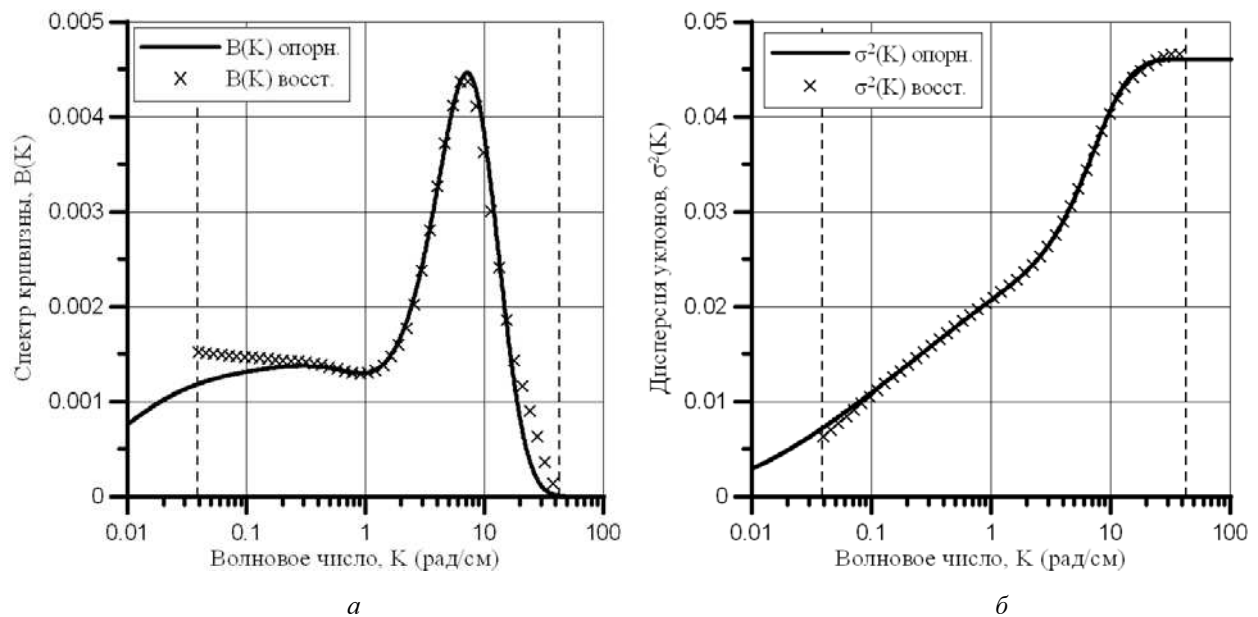


Рис. 4. Спектр кривизны  $B(K)$  и функция  $\sigma^2(K)$ , восстановленные в соответствии с разработанной методикой. Случай отсутствия вариаций входных параметров

Также, в ходе выполнения исследований, была проведена оценка влияния на результат восстановления параметров спектра внешних факторов. К ним были отнесены: ошибки определения интегрального поглощения атмосферы, ошибки определения калибровочных коэффициентов радиометрических приемников, ошибки юстировки антенных систем радиометрических приемников, реальные характеристики антенных систем, присутствие кросс-поляризационных эффектов, вариации температуры воды, воздуха и значений солености. Подробное описание полученных результатов может быть найдено в работе [2].

## Заключение

Анализ результатов модельных расчетов, представленных в данной работе, позволяет сделать следующие выводы:

- Расчетные значения радиоярких контрастов, в силу резонансного характера радиотеплового излучения на волновых числах, близких к длине волны используемых радиометров, проявляют сильную зависимость от формы спектра поверхностного волнения.

- «Уникальный» характер функции  $\Delta T_{\text{я}}$ , соответствующей конкретному набору параметров водной поверхности и атмосферы, позволяет решить задачу восстановления параметров спектра ГКВ путем подбора  $B(K)$  и  $\sigma_0^2$ , минимизирующих значение функции невязки.

- Разработанная методика восстановления параметров спектра ГКВ, в отсутствие влияния вариаций входных данных позволяет восстанавливать значения  $B(K)$ ,  $\sigma^2(K)$  и  $\sigma_0^2$  с точностью не хуже 7,0%, 1,0% и 15,0% соответственно.

- Основное влияние на качество решения ОЗ, как и в случае прямой задачи оказывают: ошибки определения интегрального поглощения атмосферы; ошибки определения калибровочных коэффициентов радиометрических приемников; ошибки юстировки антенных систем радиометрических приемников; реальные характеристики антенных систем; присутствие кросс-поляризационных эффектов. По сравнению с перечисленными факторами, влиянием вариаций температур воды, воздуха и значений солености можно пренебречь.

- Диапазон волновых чисел, в котором могут быть восстановлены параметры спектра, определяется максимальным и минимальным значениями частот используемых радиометрических каналов.

- Использование данных многочастотных измерений позволяет повысить достоверность восстанавливаемых значений и минимизировать влияние ошибок различного характера.

- Положительные результаты модельных расчетов, подтверждают возможность использования разработанного алгоритма для анализа данных натурных исследований при учете требований предыдущего пункта.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 05-05-64451-а и INTAS 03-51-4789.

## Литература

1. Трохимовский Ю.Г. Модель радиотеплового излучения взволнованной морской поверхности // Исследование Земли из космоса. 1997. № 1. С. 39–49.
2. Садовский И.Н. Поляризационные радиотепловые методы в исследованиях параметров морского волнения: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: ИКИ РАН, 2007. 184 с.
3. Кравцов Ю.А., Мировская Е.А., Попов А.Е., Троицкий И.А., Эткин В.С. Критические явления при тепловом излучении периодически неровной водной поверхности // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1978. Т. 14. № 7. С. 733–739.
4. Ирисов В.Г., Трохимовский Ю.Г., Эткин В.С. Радиотепловая спектроскопия морской поверхности // ДАН СССР. 1987. Т. 297. № 3. С. 587–589.
5. Садовский И.Н. Алгоритм восстановления параметров спектра гравитационно-капиллярных волн на основе данных угловых радиополяриметрических измерений // 7-я Международная научно-технич. конф. «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии»: Сб. докл. Владимир, 2006а. С. 79–82.
6. Apel J.R. An improved ocean surface wave vector spectrum // J. Geophysical Research. 1994. V. 99. P. 16.269–16.291.