

## Об определении температуры и солёности морской воды средствами активного зондирования океана

А. С. Запевалов

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия  
E-mail: sevzepter@mail.ru*

Известные ограничения в использовании микроволновых радиометров для дистанционного определения физико-химических характеристик (температуры и солёности) морской воды требуют разработки новых подходов к решению этой задачи. В настоящей работе анализируется возможность измерения температуры и солёности приповерхностного слоя океана средствами активного радиозондирования. Основным фактором, препятствующим реализации этого подхода, является зависимость рассеянного радиосигнала от меняющегося в широких пределах уровня спектральной плотности резонансных поверхностных волн. Вызванные изменением спектральной плотности резонансных волн изменения радиосигнала происходят в значительно более широких пределах, чем изменения, вызванные вариациями температуры или солёности. Для уменьшения влияния этого фактора на результаты измерений предложено использовать поляризационное отношение. Показано, что чувствительность поляризационного отношения к изменениям температуры и солёности имеет тот же порядок, что и чувствительность к этим параметрам данных радиометрических измерений. Поляризационное отношение также подвержено влиянию изменений уровня шероховатости морской поверхности. На него влияют вариации локального угла падения, вызванные присутствием поверхностных волн, длина которых много больше длины резонансных волн. Показано, что изменения скорости ветра, определяющие характеристики шероховатости морской поверхности, примерно в равной мере влияют на поляризационное отношение и радиояркостную температуру.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли, активное радиозондирование, радиометрические измерения, морская поверхность, обратные задачи

Одобрена к печати: 19.11.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-131-140

### Введение

В настоящее время основным источником информации о физико-химических характеристиках приповерхностного слоя Мирового океана являются микроволновые радиометры космического базирования (Кузьмин и др., 2015). Выходные сигналы СВЧ-радиометров пропорциональны излучательной способности морской поверхности, которая слабо меняется в диапазоне характерных для Мирового океана изменений температуры и солёности (Данилычев и др., 2015; Заболотских и др., 2013; Blume et al., 1978). Это обстоятельство накладывает ограничения на разрешающую способность СВЧ-радиометров (Арманд и др., 2010), а также на возможную точность восстановления параметров морской среды (Садовский, 2007; Wu et al., 2013). Развитие микроволновой радиометрии происходит по нескольким направлениям: расширяется частотный диапазон измеряемого радиотеплового излучения, разрабатывается высокочувствительная приёмная аппаратура, повышается пространственное разрешение путём изменения приёмной антенны (Поспелов, 2004).

Ограничения в использовании радиометров требуют разработки новых методов измерений. Одним из таких методов является определение физико-химических характеристик морской поверхности по данным активного радиозондирования в СВЧ-диапазоне. Отражённый от морской поверхности радиосигнал зависит от её шероховатости и от относительной диэлектрической проницаемости воды под границей «океан – атмосфера» (Терехин, Пустовойтенко, 1986; Plant, 2002; Valenzuela, 1978). В свою очередь, относительная диэлектрическая проницаемость зависит от температуры и солёности морской воды, а также от длины зондирующей радиоволны (Meissner, Wentz, 2004). Эти зависимости, в принципе, позволяют

решать обратную задачу, т. е. восстанавливать температуру и солёность по данным дистанционного зондирования.

Проблема измерения физико-химических характеристик морской воды активным радиозондированием заключается в том, что основным фактором, определяющим рассеянный радиосигнал, является уровень шероховатости морской поверхности (Басс, Фукс, 1972). Вариации радиосигнала, вызванные искажением шероховатости, значительно превосходят изменения, обусловленные другими факторами. Это обстоятельство, в частности, позволило в 1966 г. предложить способ дистанционного определения скорости приводного ветра регистрацией рассеяния радиоволн на границе «океан – атмосфера» (Moore, Pierson, 1966). Таким образом, чтобы по данным радиолокационных измерений определять физико-химические характеристики морской воды, необходимо минимизировать влияние изменений шероховатости морской поверхности.

В настоящей работе анализируются возможности и ограничения определения температуры и солёности морской воды по данным активного радиозондирования в СВЧ-диапазоне.

### Резонансное рассеяние

Рассмотрим ситуацию, когда регистрируемый радиолокатором сигнал определяет резонансный (брегговский) механизм рассеяния. Резонансное рассеяние создают поверхностные волны длиной  $\Lambda_R$ , которые распространяются вдоль направления зондирования и удовлетворяют условию:

$$\Lambda_R = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — длины радиоволны;  $\theta$  — угол падения (Басс, Фукс, 1972). В ситуации, когда резонансные волны распространяются по плоской поверхности, нормированное сечение обратного рассеяния можно записать в виде (Kudryavtsev et al., 2002):

$$\sigma_{pp}^0 = 8\pi k^4 \cdot \cos^4 \theta \left| G_{pp}(\theta, \varepsilon) \right|^2 \left[ \Psi(\vec{K}_R) + \Psi(-\vec{K}_R) \right], \quad (2)$$

где  $p$  — поляризации излучаемого и принимаемого сигналов соответственно;  $G_{pp}(\theta, \varepsilon)$  — коэффициент рассеяния;  $\varepsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость морской воды;  $\Psi(-\vec{K}_R)$  — спектр морской поверхности;  $\vec{K}_R$  — волновой вектор резонансных поверхностных волн.

Коэффициенты рассеяния описываются выражениями (Plant, 2002; Valenzuela, 1978):

$$G_{VV}(\theta, \varepsilon) = \frac{(\varepsilon - 1) [\varepsilon(1 + \sin^2 \theta) - \sin^2 \theta]}{[\varepsilon \cdot \cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}]^2}, \quad (3)$$

$$G_{HH}(\theta, \varepsilon) = \frac{\cos^2 \theta \cdot (\varepsilon - 1)}{[\cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}]^2}. \quad (4)$$

Коэффициенты рассеяния, как следует из выражений (3) и (4), зависят от угла падения радиоволн и относительной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  морской воды под границей «океан – атмосфера». Относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  является функцией трёх переменных: температуры  $T$  и солёности  $S$  морской воды, а также длины  $\lambda$  (или частоты) зондирующей радиоволны. Таким образом, рассеянный назад радиосигнал несёт информацию о температуре и солёности морской воды. На практике прямые измерения физико-химических характеристик морской воды неосуществимы, поскольку относительные изменения спектра  $\Psi(-\vec{K}_R)$  значительно больше относительных изменений коэффициента рассеяния  $\left| G_{pp}(\theta, \varepsilon) \right|^2$ .

Исключить зависимость от шероховатости морской поверхности, которую характеризует спектр  $\Psi(-\vec{K}_R)$ , можно зондированием одного и того же участка поверхности на разных поляризациях. Из выражения (2) следует, что поляризационное отношение не зависит от спектра  $\Psi(-\vec{K}_R)$ :

$$R^0 = \frac{\sigma_{HH}^0}{\sigma_{VV}^0} = \frac{|G_{HH}(\theta, \varepsilon)|^2}{|G_{VV}(\theta, \varepsilon)|^2}, \quad (5)$$

где индексы  $H$  и  $V$  соответствуют горизонтальной и вертикальной поляризациям. Таким образом, оно не меняется при изменении уровня шероховатости.

При зондировании морской поверхности в СВЧ-диапазоне резонансными являются гравитационно-капиллярные и самые короткие гравитационные волны. Поскольку на морской поверхности всегда существуют волны, длина которых много больше длины резонансных волн, то резонансные волны распространяются по криволинейной поверхности, созданной длинными волнами. Криволинейность поверхности приводит к изменению локального угла падения на величину угла локального наклона  $\beta$ , создаваемого длинными волнами в плоскости зондирования. Вследствие изменения локального угла  $\theta_L$  меняется условие резонанса (1), а также значение коэффициента рассеяния  $|G_{pp}(\theta_L, \varepsilon)|^2$ .

Учесть эффект криволинейности поверхности, по которой распространяются резонансные волны, можно, усреднив сечения обратного рассеяния  $\sigma_{pp}^0$  по всему диапазону углов  $\beta$  (Zarevalov, 2009). Для этого необходимо преобразовать спектр шероховатости  $\Psi(\vec{K})$ , представив его как функцию угла падения.

Перейдём от спектра  $\Psi(\vec{K})$  к спектру волновых чисел и направлений  $\Phi(K, \alpha)$ , записав его в виде:

$$\Phi(K, \alpha) = S(K)\Theta(K, \alpha),$$

где  $K = |\vec{K}|$  — волновое число поверхностных волн;  $S(K)$  — ненаправленный спектр, который может быть получен интегрированием  $\Phi(K, \alpha)$  по всем направлениям;  $\Theta$  — функция распределения энергии поверхностных волн по направлениям, удовлетворяющая условию нормировки  $\int_{-\pi}^{\pi} \Theta(K, \alpha) d\alpha = 1$ ;  $\alpha$  — азимутальный угол. В итоге получаем:

$$\sigma_{pp}^0 = 2k^2 |G_{pp}(\theta, \varepsilon)|^2 \frac{\tilde{S}(k \cdot 2 \sin \theta)}{\sin \theta \cdot \cos \theta} [\Theta(k \cdot 2 \sin \theta, \alpha_R) + \Theta(k \cdot 2 \sin \theta, \pi + \alpha_R)], \quad (6)$$

где спектр  $\tilde{S}(k \cdot 2 \sin \theta)$  связан со спектром  $S(K)$  соотношением:

$$\tilde{S}(k \cdot 2 \sin \theta) = S(K) \frac{dK}{d\theta},$$

в котором  $dK/d\theta = k \cdot 2 \cos \theta$ ;  $\alpha_R$  — азимутальный угол распространения резонансных волн.

Усреднение выражения (6) по углам наклонов  $\beta$  осуществляется с весом, пропорциональным их плотности вероятности:

$$\sigma_{pp}^L = 2k^2 \int |G_{pp}(\theta_L, \varepsilon)|^2 \frac{\tilde{S}(k \cdot 2 \sin \theta_L)}{\sin \theta_L \cdot \cos \theta_L} [\Theta(k \cdot 2 \sin \theta_L, \alpha_R) + \Theta(k \cdot 2 \sin \theta_L, \pi + \alpha_R)] P(\beta) d\beta, \quad (7)$$

где  $\theta_L = \theta - \beta$  — локальный угол падения;  $P(\beta)$  — плотность вероятностей углов  $\beta$ . Присутствие длинных волн меняет величины сечений обратного рассеяния на обеих поляризациях, а также величину поляризационного отношения. На криволинейной поверхности, образованной длинными (по сравнению с длиной радиоволны) волнами, поляризационное отношение имеет вид:

$$R^L = \frac{\int \sigma_{VV}^0(\theta - \beta)P(\beta)d\beta}{\int \sigma_{HH}^0(\theta - \beta)P(\beta)d\beta}. \tag{8}$$

### Изменчивость поляризационного отношения

Оценим, как изменения локального угла падения влияют на поляризационное отношение. Расчёты проведём для случая, когда зондирование морской поверхности осуществляется в *Ku*- и *L*-диапазонах. В указанных диапазонах длины радиоволн находятся в пределах от 1,6 до 2,5 см и от 15 до 30 см соответственно. Будем полагать, что плотность вероятностей углов  $\beta$  описывается распределением Гаусса.

В океанологических исследованиях, как правило, определяются не углы наклона морской поверхности, а её уклоны, являющиеся первыми пространственными производными возвышений поверхности. Уклоны морской поверхности  $\xi$  малы, что позволяет использовать аппроксимацию  $\beta \approx \text{arctg } \xi$ . Погрешность данной аппроксимации составляет 5–7 %, если уклоны создают волны всех масштабов (Запевалов, Лебедев, 2014).

Дисперсии уклонов  $D_\beta$ , создаваемые длинными волнами, можно задать с помощью полуэмпирической модели (Wilheit, 1979), которая определяет дисперсию  $D_\beta$  как часть рассчитанной по оптическим измерениям общей дисперсии, созданной волнами всех масштабов (Cox, Munk, 1954). При зондировании вдоль направления ветра, что соответствует ситуации, когда влияние длинных волн наибольшее, получаем:

$$D_\beta = (0,001 + 0,00316W) \cdot (0,3 + 0,02f), \tag{9}$$

где  $W$  — скорость ветра, м/с;  $f$  — частота радиоволны, ГГц. Среднее значение  $f$  для *Ku*-диапазона составляет 15 ГГц, для *L*-диапазона — 1,5 ГГц.

Для расчётов относительной диэлектрической проницаемости использована предложенная в работе (Meissner, Wentz, 2004) модель, которая построена на основе двухчастотной аппроксимации Дебая:

$$\epsilon_r(T, S) = \frac{\epsilon_s(T, S) - \epsilon_1(T, S)}{1 + i\nu/\nu_1(T, S)} + \frac{\epsilon_1(T, S) - \epsilon_\infty(T, S)}{1 + i\nu/\nu_2(T, S)} + \epsilon_\infty(T, S) - i \frac{\sigma(T, S)}{2\pi\epsilon_0\nu},$$

где  $T$  и  $S$  — температура и солёность морской воды;  $\nu$  — частота;  $\epsilon_s(T, S)$  — статическая диэлектрическая проницаемость;  $\epsilon_1(T, S)$  — промежуточный диэлектрический параметр;  $\epsilon_\infty(T, S)$  — «оптическая» диэлектрическая проницаемость;  $\nu_1(T, S)$ ,  $\nu_2(T, S)$  — первая и вторая частоты релаксации Дебая;  $\sigma(T, S)$  — электропроводность воды;  $\epsilon_0$  — диэлектрическая постоянная.

Чтобы оценить возможность использования поляризационного отношения для измерения температуры и солёности, необходимо определить относительное изменение  $R^0$  при изменении температуры в пределах от 0 до 30°, а также солёности от 0 до 38 ‰. Расчёты проводились при длинах волн  $\lambda = 2,1; 21$  и 30 см. Длины волн 2,1 и 21 см соответствуют примерно середине *Ku*- и *L*-диапазонов; длина волны 30 см — верхней границе *L*-диапазона. Поляризационное отношение сильно меняется при изменении угла падения или длины радиоволны. Поэтому для удобства сравнения чувствительности поляризационного отношения к изменениям температуры и солёности при измерениях в разных условиях введено нормирование, так что в первом случае при температуре 0° и во втором случае при солёности 0 ‰ нормированное поляризационное отношение  $\tilde{R}^0$  равно единице.

Результаты расчётов, характеризующих зависимость поляризационного отношения от температуры, представлены на рис. 1 (см. с. 135). Видно, что с ростом угла падения  $\theta$  чувствительность параметра  $\tilde{R}^0$  к изменениям температуры возрастает на всех длинах волн. При зондировании в сантиметровом диапазоне наиболее высокая чувствительность наблюдается в температурной области от 0 до 10°.

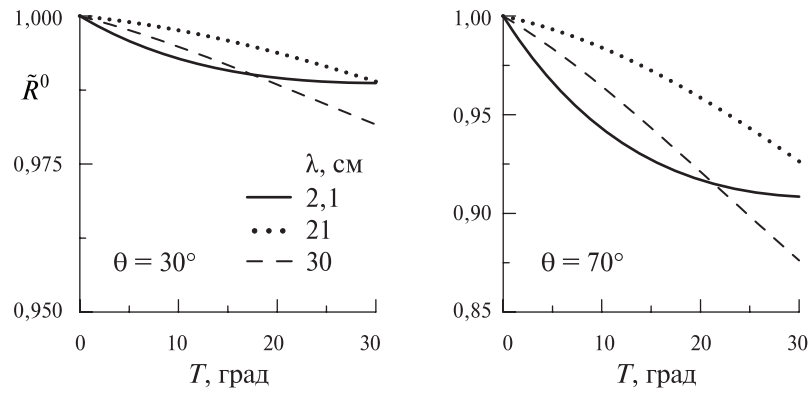


Рис. 1. Зависимости параметра  $\tilde{R}^0$  от температуры  $T$  морской воды

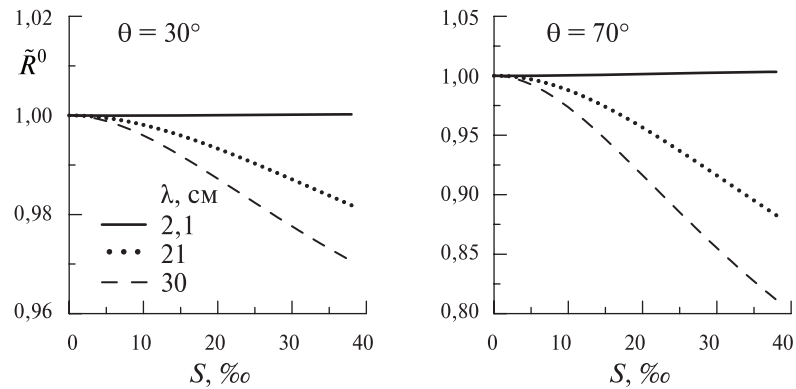


Рис. 2. Зависимости параметра  $\tilde{R}^0$  от солёности  $S$  морской воды

Изменение параметра  $\tilde{R}^0$  в зависимости от солёности морской воды показаны на рис. 2. Как и при анализе влияния изменений температуры на поляризационное отношение, видно, что чувствительность растёт с увеличением угла падения. Наблюдается чёткая тенденция увеличения чувствительности с ростом длины радиоволны.

Относительное изменение параметра  $\tilde{R}^0$  (как можно судить по рис. 2 в работе (Данилычев и др., 2015)) сравнимо с относительным изменением коэффициента излучения и собственной радиояркостной температуры гладкой водной поверхности при изменении её термодинамической температуры в тех же пределах, для которых здесь построен рис. 1.

Если резонансные волны распространяются по плоской поверхности, то, как было показано выше (см. уравнение (5)), поляризационное отношение определяется двумя параметрами: углом падения и относительной диэлектрической проницаемостью. Если они распространяются по криволинейной поверхности, созданной длинными волнами, то меняется локальный угол падения и поляризационное отношение зависит также от распределения созданных ими уклонов в направлении зондирования (см. уравнение (8)). Таким образом, присутствие поверхностных волн, длина которых много больше длины зондирующей радиоволны, является фактором, ограничивающим возможность определения температуры и солёности.

С ростом дисперсии уклонов, создаваемых длинными волнами, нормированное сечение обратного рассеяния растёт при зондировании как на горизонтальной, так и на вертикальной поляризации. Причём рост при зондировании на горизонтальной поляризации происходит быстрее, что приводит к изменению поляризационного отношения. Влияние этого фактора показано на рис. 3 (см. с. 136), где представлены зависимости поляризационного отношения в присутствии длинных волн  $R^L = R^L(W)$ , рассчитанные для трёх длин радиоволн и двух углов падения.



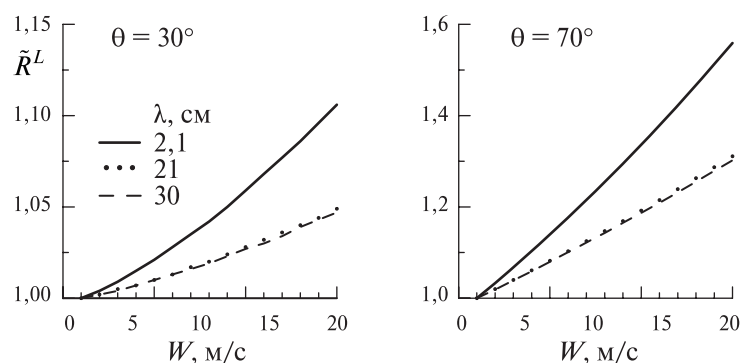


Рис. 3. Зависимости параметра  $\tilde{R}^L$  от скорости ветра  $W$

Чтобы оценить относительные изменения поляризационного отношения, которые происходят при изменении скорости ветра, введена нормировка  $\tilde{R}^L(W) = R^L(W)/R^L(W = 1 \text{ м/с})$ . Видно, что при зондировании морской поверхности в  $Ku$ -диапазоне влияние волн более длинных, чем длина зондирующей радиоволны, выше, чем при зондировании в  $L$ -диапазоне. С ростом угла падения влияние длинных волн на поляризационное отношение  $R^L$  увеличивается.

Между собой нормированные сечения обратного рассеяния  $\sigma_{pp}^0$  и  $\sigma_{pp}^L$  связаны интегральным уравнением  $\sigma_{pp}^L = \int \sigma_{VV}^0(\theta - \beta)P(\beta)d\beta$ , которое позволяет установить связь между этими параметрами при разных скоростях ветра. Эта связь (она исследовалась в работе (Zapevalov, 2009)), позволяет исключить влияние ветра и перейти от поляризационного отношения  $R^L$  к  $R^0$ .

В последнее десятилетие ведутся активные исследования зависимостей от скорости ветра статистических характеристик уклонов, создаваемых волнами, длина которых много больше длины зондирующей радиоволны (Данилычев и др., 2009; Караев и др., 2012; Chen et al., 2015). Получение этих зависимостей позволит при определении температуры и солёности по данным активного радиозондирования вводить коррекцию, которая будет учитывать изменения шероховатости морской поверхности.

Топографические характеристики морской поверхности неоднозначно зависят от скорости ветра. На структуру поля поверхностных волн влияет большое число разных по своей физической природе факторов. Это обстоятельство, в частности, ограничивает точность дистанционного измерения с космических аппаратов скорости приводного ветра, который рассчитывается по изменению шероховатости морской поверхности (Запелов и др., 2006). Вводя коррекцию, учитывающую изменения скорости ветра, можно минимизировать ошибки определения температуры и солёности, но нельзя полностью исключить их.

Следует отметить, что изменение шероховатости морской поверхности также является фактором, существенно влияющим на результаты радиометрических измерений (Поспелов и др., 2007; Meissner, Wentz, 2002). С усилением ветра излучательная способность океана увеличивается, её рост зависит от частоты и поляризации (Hejazi et al., 2015). Согласно рис. 1 в работе (Заболотских и др., 2013), для частоты 10,65 ГГц (длина волны 2,8 см) относительное изменение излучательной способности при изменении ветра от 1 до 15 м/с составляет 10 % на горизонтальной поляризации и 2 % — на вертикальной.

При определении физико-химических характеристик морской среды средствами дистанционного зондирования остаётся неопределённость, вызванная тем, что относительная диэлектрическая проницаемость зависит от двух неизвестных параметров: температуры и солёности. Эта неопределённость имеет место как при пассивном, так и при активном зондировании морской поверхности. В работе (Klemas, 2011) для определения солёности путём измерения радиометрической яркостной температуры предложено использовать независимый метод определения температуры (инфракрасный радиометр). Этот же подход можно реализовать и при активном зондировании.

Разделить вклад температуры и солёности можно также, зондируя морскую поверхность на нескольких длинах радиоволн. При этом предполагается, что все остальные параметры, входящие в выражения (6) и (8), заданы. Поскольку сечение обратного рассеяния является функцией скорости ветра, то её значение можно определить по данным зондирования на одной поляризации. Зная скорость ветра, с помощью соотношения (9) несложно оценить дисперсии углов  $\beta$ . Угол падения  $\theta$  является известным параметром. В этом случае, представив относительную диэлектрическую проницаемость как функцию двух переменных ( $T$  и  $S$ ) и решая систему двух уравнений, можно рассчитать температуру и солёность.

## Заключение

Представленный анализ показывает принципиальную возможность определения температуры и солёности по данным активного радиозондирования. Сравнивая активные и пассивные методы дистанционного определения температуры и солёности морской поверхности, отметим, что они имеют чувствительность одного порядка. Преимуществом пассивных методов является малогабаритность и более низкая стоимость аппаратуры для их реализации. Достоинство активных методов состоит в значительно более высоком пространственном разрешении.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства научных организаций (госзадание 0827-2018-0003).

## Литература

1. Арманд Н. А., Тищенко Ю. Г., Саворский В. П., Смирнов М. Т., Аблязов В. С., Халдин А. А. Перспективные космические проекты с СВЧ-радиометрическими системами L-диапазона // Исследование Земли из космоса. 2010. № 1. С. 20–26.
2. Басс Ф. Г., Фукс И. М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.
3. Данилычев М. В., Николаев А. Н., Кутуза Б. Г. Использование метода Кирхгофа для практических расчетов в микроволновой радиометрии взволнованной морской поверхности // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. № 8. С. 915–925.
4. Данилычев М. В., Кутуза Б. Г., Калюшин В. А., Мошков А. В. Использование радиометрии СВЧ-диапазона для измерения солёности поверхностных вод Мирового океана // Журн. радиоэлектроники. 2015. № 1. С. 1–13.
5. Заболотских Е. В., Митник Л. М., Шапрон Б. Ж. А., Анискина О. Г., Смирнова Ю. Е., Дикинис А. В. Улучшенные модели поглощения атмосферы и излучения океана в диапазоне 5–100 ГГц для расчета яркостных температур системы океан-атмосфера // Ученые записки Российского гос. гидрометеоролог. ун-та. 2013. № 29. С. 169–182.
6. Запевалов А. С., Лебедев Н. Е. Моделирование статистических характеристик поверхности океана при дистанционном зондировании в оптическом диапазоне // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 1. С. 28–33.
7. Запевалов А. С., Показеев К. В., Пустовойтенко В. В. О предельной точности альтиметрического определения скорости приводного ветра // Исследование Земли из космоса. 2006. № 3. С. 49–54.
8. Караев В. Ю., Панфилова М. А., Баландина Г. Н., Чу К. Восстановление дисперсии наклонов крупномасштабных волн по радиолокационным измерениям в СВЧ-диапазоне // Исследование Земли из космоса. 2012. № 4. С. 62–77.
9. Кузьмин А. В., Репина И. А., Садовский И. Н., Селунский А. Б. Микроволновые радиометрические исследования морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 76–97.
10. Поспелов М. Н. Применение поляризационной радиометрии в дистанционном зондировании: история и перспективы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. Вып. 1. Т. 1. С. 58–69.
11. Поспелов М. Н., Горячкин Ю. А., Комарова Н. Ю., Кузьмин А. В., Репина И. А., Ситнянский Б. Д., Смирнов М. Т. Комплексный радиофизический эксперимент по дистанционному зондированию морской

- поверхности CAPMOS'05 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Вып. 4. Т. 1. С. 337–348.
12. Садовский И. Н. Поляризационные радиотепловые методы в исследованиях параметров морского волнения: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Москва, 2007. 184 с.
  13. Терехин Ю. В., Пустовойтенко В. В. Влияние температуры и солёности морской воды на характеристики радиолокационного сигнала СВЧ-диапазона // Исследование Земли из космоса. 1986. № 2. С. 16–21.
  14. Blume H. J. C., Kendall B. M., Fedors J. C. Measurement of ocean temperature and salinity via microwave radiometry // *Boundary-Layer Meteorology*. 1978. No. 13. P. 295–308.
  15. Chen P., Yin Q., Huang P. Effect of non-Gaussian properties of the sea surface on the low-incidence radar backscatter and its inversion in terms of wave spectra by an ocean wave // *Chinese J. Oceanology and Limnology*. 2015. V. 33. No. 5. P. 1142–1156.
  16. Cox C., Munk W. Measurements of the roughness of the sea surface from photographs of the sun glitter // *J. Optical Society of America*. 1954. V. 44. No. 11. P. 838–850.
  17. Hejazin Y., Jones W. L., Santos-Garcia A., Jacob M. M., El-Nimri S. F. A roughness correction for aquarius sea surface salinity using the CONAE microwave radiometer // *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2015. V. 8. No. 12. P. 5500–5510.
  18. Klemas V. Remote sensing of sea surface salinity: an overview with case studies // *J. Coastal Research*. 2011. V. 27. No. 5. P. 830–838.
  19. Kudryavtsev V., Hauser D., Caudal G., Chapron B. A semiempirical model of the normalized radar cross-section of the sea surface, 1, Background model // *J. Geophysical Research*. 2002. V. 107. No. C3. 8054. DOI: 10.1029/2001JC001003.
  20. Meissner T., Wentz F. An updated analysis of the ocean surface wind direction signal in passive microwave brightness temperatures // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2002. V. 40. No. 6. P. 1230–1240.
  21. Meissner T., Wentz F. J. The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2004. V. 42. No. 9. P. 1836–1849.
  22. Moore R. K., Pierson W. J. Measuring sea state and estimating surface winds from a polar orbiting satellite // *Proc. Intern. Symp. Electromagnetic Sensing of the Earth from Satellites*. Miami Beach, FL. 1966. P. R1–R28.
  23. Plant J. W. A stochastic, multiscale model of microwave backscatter from the ocean // *J. Geophysical Research*. 2002. V. 107. No. C9. 3120. DOI: 10.1029/2001JC000909.
  24. Valenzuela G. Theories for the interaction of electromagnetic and ocean waves — A Review // *Boundary Layer Meteorology*. 1978. V. 13. No. 1–4. P. 61–85.
  25. Wilheit T. T. A Model for the Microwave Emissivity of the Ocean's Surface as a Function of Wind Speed // *IEEE Trans. Geoscience Electronics*. 1979. V. 7. No. 4. P. 244–249.
  26. Wu B. H., Wang X., Ma H., Li S. Sensitivity Analysis of ocean microwave radiation characteristics // *Advanced Materials Research*. 2013. V. 726–731. P. 4718–4722.
  27. Zapevalov A. S. Bragg scattering of centimeter electromagnetic radiation from the sea surface: The effect of waves longer than Bragg components // *Izvestiya — Atmospheric and Ocean Physics*. 2009. V. 45. Iss. 2. P. 253–261.

## On definition of temperature and salinity of sea water by means of active sounding of the ocean

A. S. Zapevalov

*Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia*  
*E-mail: sevzepter.mail.ru*

The known limitations in the use of microwave radiometers for remote determination of physico-chemical characteristics (temperature and salinity) of sea water require new approaches to solve this problem. In this paper, the possibility of determining the temperature and salinity of the near-surface layer of the ocean by means of active radiosounding is analyzed. The main factor hampering the



implementation of this approach is the dependence of the scattered radio signal on the level of the spectral density of resonant surface waves which varies widely. Changes in the radio signal caused by changes in the spectral density of resonant waves occur within a much wider range than changes caused by variations in temperature or salinity. To reduce the effect of this factor on the results of measurements, it is proposed to use the polarization ratio. It is shown that the sensitivity of the polarization ratio to changes in temperature and salinity is of the same order of magnitude as the sensitivity to these parameters of radiometric measurements. The polarization ratio is also affected by changes in the level of sea surface roughness. It is influenced by variations in the local angle of incidence caused by the presence of surface waves whose length is much greater than the length of the resonant waves. It is shown that changes in wind speed, which determine the characteristics of the roughness of the sea surface, approximately equally affect the polarization ratio and the brightness temperature.

**Keywords:** remote sensing of the Earth, active radio sounding, radiometric measurements, sea surface, inverse problems

Accepted: 19.11.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-131-140

## References

1. Armand N. A., Tishchenko Yu. G., Savorskiy V. P., Smirnov M. T., Ablyazov V. S., Khaldin A. A., Perspektivnye kosmicheskie proyekty s SVCh-radiometricheskimi sistemami L-diapazona (Promising space projects with l-band microwave radiometric systems), *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*, 2010, No. 1, pp. 20–26.
2. Bass F. G., Fuks I. M., *Rasseyaniye voln na statisticheski nerovnoyi poverkhnosti* (Scattering of waves on a statistically uneven surface), Moscow: Nauka, 1972, 424 p.
3. Danilychev M. V., Nikolaev A. N., Kutuza B. G., Ispolzovanie metoda Kirkhgofa dlya prakticheskikh raschetov v mikrovolnovoi radiometrii v zvolnovannoi morskoi poverkhnosti (The use of Kirchoff method for practical calculations in microwave radiometry of the rough sea surface), *Radiotekhnika i elektronika*, 2009, Vol. 54, No. 8, pp. 915–925.
4. Danilychev M. V., Kutuza B. G., Kaloshin V. A., Moshkov A. V., Ispolzovaniye radiometrii SVCh-diapazona dlya izmereniya solenosti poverkhnostnykh vod Mirovogo okeana (Using microwave radiometry to measure the salinity of surface waters of the World Ocean), *Zhurnal Radioelektroniki*, 2015, No. 1, pp. 1–13.
5. Zabolotskikh E. V., Mitnik L. M., Shapron B. Zh. A., Aniskina O. G., Smirnova Yu. E., Dikinis A. V., Uluchshennye modeli pogloshcheniya atmosfery i izlucheniya okeana v diapazone 5–100 GGc dlya rascheta yarkostnykh temperatur sistemy okean-atmosfera (Improved models of the atmospheric absorption and ocean emission in the range of 5–100 GHz for the simulation of the brightness temperatures over the open ocean), *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2013, No. 29, pp. 169–182.
6. Zapevalov A. S., Lebedev N. E., Modelirovanie statisticheskikh kharakteristik poverkhnosti okeana pri distantsionnom zondirovanii v opticheskom diapazone (Simulation of statistical characteristics of sea surface during remote optical sensing), *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2014, Vol. 27, No. 6, pp. 487–492.
7. Zapevalov A. S., Pokazeev K. V., Pustovoitenko V. V., O predel'noi tochnosti al'timetricheskogo opredeleniya skorosti privodnogo vetra (About the maximum accuracy of the surface wind altimeter estimation), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2006, No. 3, pp. 49–54.
8. Karaev V. Yu., Panfilova M. A., Balandina G. N., Chu K., Vosstanovlenie dispersii naklonov krupnomashtabnykh voln po radiolokatsionnym izmereniyam v SVCh-diapazone (The restoration of the variance of slopes of large-scale waves on radar measurements in the microwave range), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2012, No. 4, pp. 62–77.
9. Kuzmin A. V., Repina I. A., Sadovskiy I. N., Selunskiy A. B., Mikrovolnovye radiometricheskie issledovaniya morskoy poverkhnosti (Microwave radiometric studies of the sea surface), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 76–97.
10. Pospelov M. N., Primenenie polarizatsionnoi radiometrii v distantsionnom zondirovanii: istoriya i perspektivy (Application of polarization radiometry in remote sensing: history and prospects), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2004, Vol. 1, No. 1, pp. 58–69.
11. Pospelov M. N., Goryachkin Yu. A., Komarova N. Yu., Kuzmin A. V., Repina I. A., Sitnyanskii B. D., Smirnov M. T., Kompleksnyi radiofizicheskii eksperiment po distantsionnomu zondirovaniyu morskoy poverkhnosti CAPMOS'05 (Complex radiophysical experiment on remote sensing of the sea surface CAPMOS'05), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2007, Vol. 4, No. 1, pp. 337–348.

12. Sadovskii I. N., *Polyarizatsionnye radioteplovye metody v issledovaniyakh parametrov morskogo volneniya: Dis. ... kand. fiz.-mat. nauk* (Polarization of radio techniques in the study of parameters of sea waves: Cand. phys. and math. sci. thesis), Moscow, 2007, 184 p.
13. Terekhin Yu. V., Pustovoitenko V. V., Vliyanie temperatury i solenosti morskoi vody na kharakteristiki radio-lokatsionnogo signala SVCh-diapazona (Influence of sea water temperature and salinity on microwave radar signal characteristics), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1986, No. 2, pp. 16–21.
14. Blume H. J. C., Kendall B. M., Fedors J. C., Measurement of ocean temperature and salinity via microwave radiometry, *Boundary-Layer Meteorology*, 1978, No. 13, pp. 295–308.
15. Chen P., Yin Q., Huang P., Effect of non-Gaussian properties of the sea surface on the low-incidence radar backscatter and its inversion in terms of wave spectra by an ocean wave, *Chinese J. Oceanology and Limnology*, 2015, Vol. 33, No. 5, pp. 1142–1156.
16. Cox C., Munk W., Measurements of the roughness of the sea surface from photographs of the sun glitter, *J. Optical Society of America*, 1954, Vol. 44, No. 11, pp. 838–850.
17. Hejazin Y., Jones W. L., Santos-Garcia A., Jacob M. M., El-Nimri S. F., A roughness correction for aquarius sea surface salinity using the CONAE microwave radiometer, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, Vol. 8, No. 12, pp. 5500–5510.
18. Klemas V., Remote sensing of sea surface salinity: an overview with case studies, *J. Coastal Research*, 2011, Vol. 27, No. 5, pp. 830–838.
19. Kudryavtsev V., Hauser D., Caudal G., Chapron B., A semiempirical model of the normalized radar cross-section of the sea surface, 1, Background model, *J. Geophysical Research*, 2002, Vol. 107, No. C3, 8054, DOI:10.1029/2001JC001003.
20. Meissner T., Wentz F., An updated analysis of the ocean surface wind direction signal in passive microwave brightness temperatures, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2002, Vol. 40, No. 6, pp. 1230–1240.
21. Meissner T., Wentz F. J., The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2004, Vol. 42, No. 9, pp. 1836–1849.
22. Moore R. K., Pierson W. J., Measuring sea state and estimating surface winds from a polar orbiting satellite, *Proc. Intern. Symp. Electromagnetic Sensing of the Earth from Satellites*, Miami Beach, FL, 1966, pp. R1–R28.
23. Plant J. W., A stochastic, multiscale model of microwave backscatter from the ocean, *J. Geophysical Research*, 2002, Vol. 107, No. C9, 3120, DOI: 10.1029/2001JC000909.
24. Valenzuela G., Theories for the interaction of electromagnetic and ocean waves — A Review, *Boundary Layer Meteorology*, 1978, Vol. 13, No. 1–4, pp. 61–85.
25. Wilheit T. T., A model for the microwave emissivity of the ocean's surface as a function of wind speed, *IEEE Trans. Geoscience Electronics*, 1979, Vol. 17, No. 4, pp. 244–249.
26. Wu B. H., Wang X., Ma H., Li S., Sensitivity analysis of ocean microwave radiation characteristics, *Advanced Materials Research*, 2013, Vol. 726–731, pp. 4718–4722.
27. Zapevalov A. S., Bragg scattering of centimeter electromagnetic radiation from the sea surface: The effect of waves longer than Bragg components, *Izvestiya — Atmospheric and Ocean Physics*, 2009, Vol. 45, No. 2, pp. 253–261.