

Ближнеполюсная подповерхностная СВЧ радиотермометрия¹

В.Л.Вакс, К.П.Гайкович, А.Н.Резник, Н.В.Юрасова

Институт физики микроструктур РАН, ГСП-105, Нижний Новгород, 603950

В тепловом радиоизлучении поглощающей среды обнаружен эффект ближнего поля. Эффект заключается в том, что эффективная глубина формирования принимаемого излучения d_{eff} оказывается меньше, чем толщина скин-слоя и зависит от размера приёмной антенны D и её высоты над поверхностью среды h . Зависимость $d_{\text{eff}}(D, h)$ была получена из измерений излучения температурно-стратифицированной водной среды на длине волны 31 см с использованием специально разработанной электрически малой антенны. Эффект использован как основа нового метода восстановления подповерхностного профиля температуры.

1. Введение

СВЧ радиометрические измерения теплового излучения широко используются для подповерхностной диагностики сред. В задачах определения температуры такие измерения находятся вне конкуренции среди прочих дистанционных (неинвазивных) методов. В основе радиометрического метода лежит тот факт, что интенсивность теплового излучения пропорциональна средневзвешенной температуре в слое толщиной d_{eff} , в котором это излучение формируется. Изменение d_{eff} позволяет восстанавливать подповерхностный температурный профиль $T(z)$. Для этой цели ранее использовалась только зависимость d_{eff} от длины волны λ , т.е. восстановление $T(z)$ осуществлялось по данным измерений теплового излучения на нескольких длинах волн. Такой подход применялся в медицинских исследованиях, в диагностике плазмы, водной среды, грунта и т.д.

В [1] теоретически было показано, что ближнеполюсная (квазистационарная) компонента теплового излучения должна существенно влиять на интенсивность сигнала, измеряемого радиометром, если антенна имеет малые электрические размеры $D \ll \lambda$ и расположена на высоте $h \ll \lambda$ над излучающей поверхностью. В этом случае d_{eff} определяется не только λ , но также и параметрами антенны D , h . Таким образом, появляется новая возможность управления величиной d_{eff} путем изменения параметров D и h . В

¹ Результаты данной статьи получены по программе государственного контракта № 107-3 (00-П) и при поддержке РФФИ, грант № 01-02-16432.

данной работе разработана радиометрическая система для ближнепольных измерений, исследованы ближнепольные эффекты в тепловом излучении и восстановлен подповерхностный температурный профиль среды по данным ближнепольных радиометрических измерений.

2. Измерения

Тепловое излучение измерялось радиометром на рабочей частоте $\nu_0=950$ МГц с шириной полосы приёма $\Delta\nu=200$ МГц и с уровнем флуктуационной чувствительности $\delta T = 0,05$ К при постоянной интегрирования $\tau = 1$ с. Ключевым элементом приёмной системы служила электрически малая антенна с размером $D = 1$ см ($D/\lambda = 0.03$), показанная на рис.1. Она состоит из двух синфазных диполей, соединённых с симметричной полосковой линией, работающей как согласующий резонатор (прототип такой антенны описан в [2]). В качестве исследуемой среды была выбрана вода. В случае, когда антенна находилась в контакте с водной поверхностью ($h = 0$), она была согласована со входом радиометра так, что коэффициент отражения R , усреднённый по частотной полосе приёма радиометра $\Delta\nu$ не превосходил 0.03 (см. рис.2).

Коэффициент отражения R , КПД η и чувствительность δT_b антенн были исследованы в зависимости от частоты и диэлектрических параметров измеряемой среды. Так, диэлектрические параметры воды сильно зависят от температуры и солёности. Поэтому исследовалась зависимость характеристик антенны от этих величин. Установлено, что коэффициент отражения антенны практически не зависит от температуры и солёности воды в полосе частот радиометра $\nu_0 \pm \Delta\nu/2$. КПД антенны при $h = 0$ составил $\eta = 0,85$. Увеличение высоты приводит как к рассогласованию антенны (возрастанию R), так и к уменьшению η . Порог чувствительности к температурным вариациям возрастает от 0.06 К при $h = 0$ до 1 К при максимально возможной для измерений высоте $h_{\max} = 2.5$ мм. Дальнейшее уменьшение чувствительности при $h > h_{\max}$ сделало невозможными измерения на таких высотах. Таким образом, в отличие от аналогичных систем активной локации, известных как ближнепольные микроскопы, согласованная высокоэффективная антенна является необходимым компонентом ближнепольной радиометрической системы.

3. Ближнепольные эффекты

Для измерений $d_{\text{эф}}$, путём использования нагревателя на поверхности и охладителя у дна цилиндрического сосуда создавался устойчивый квазилинейный профиль $T(z)$ (см. схему измерений на рис.3). При этом удалось достичь значения стационарного

градиента температуры $dT/dz = 2.5 \text{ K/cm}$. Для линейного $T(z)$ получено простое выражение для измеряемой яркостной температуры: $T_b = T(z=-d_{\text{eff}})$, которое и было использовано для определения d_{eff} . Поскольку диэлектрическая проницаемость воды ϵ удовлетворяет условию $|\epsilon| \gg 1$, для волновой компоненты теплового излучения значение d_{eff} равно значению толщины скин-слоя $d_{\text{sk}} = \lambda / (4\pi \text{Im}\sqrt{\epsilon})$. Для ближнепольной компоненты имеем $d_{\text{eff}}(D, h) < d_{\text{sk}}$. В наших измерениях было получено, что $d_{\text{eff}}(D=1 \text{ cm}, h=0) \approx 0,5 d_{\text{sk}}$.

Выражение для эффективной яркостной температуры принимаемого на длине волны λ излучения может быть представлено в компактном виде как:

$$T_b(h, D) = \int_{-\infty}^0 T(z) K(h, D, z) dz, \quad (1)$$

где h – высота антенны над поверхностью среды, D – эффективный размер антенны. Ядро K в (2) можно представить как сумму вкладов квазистационарной и волновой компонент поля. Квазистационарная компонента преобладает, когда $D \ll \lambda$ и $h \ll \lambda$. В этом случае глубина слоя, который даёт основной вклад в значение измеряемого теплового излучения в (1) (эффективная глубина формирования яркостной температуры) $d_{\text{eff}} = \left| \int_{-\infty}^0 z K(h, D, Z) dz \right|$, может быть много меньше, чем величина скин-слоя поглощения d_{sk} . Волновая компонента доминирует, когда $D \geq \lambda$ или $h \geq \lambda$, тогда $d_{\text{eff}} \rightarrow d_{\text{sk}}$. В произвольном случае, когда принимаемое излучение включает обе компоненты, d_{eff} будет зависеть от высоты антенны и её размера, т.е. $d_{\text{eff}} = d_{\text{eff}}(h, D) < d_{\text{sk}}$. Интегральное уравнение (1) использовалось в [4] для вычислений яркостной температуры с целью постановки и численного моделирования решения обратной задачи восстановления температурного профиля по известной зависимости $T_b(D)$ или $T_b(h)$. Оно также используется ниже для расчетов T_b по известному профилю $T(z)$ для сравнения с экспериментальными результатами.

Измерения температурно-стратифицированной водной среды проводились при трёх значениях солёности: $S = 0, 1.8 \cdot 10^{-3}$ and $5.0 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$. Значение солёности $S = 1.8 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$ является некоторой особой точкой, поскольку при этом значении на данной частоте толщина скин-слоя воды практически не зависит от температуры и среда может рассматриваться как однородная по диэлектрическим свойствам. Вычисления T_b при других S также проводились в приближении однородной среды с

постоянным по глубине значением диэлектрической проницаемости воды для температуры $T(z = -d_{\text{eff}})$. Самый существенный результат измерений состоит в том, что была зарегистрирована зависимость яркостной температуры T_b и эффективной толщины d_{eff} от размера и высоты антенны, и эти зависимости оказались в хорошем соответствии с вычисленными теоретически на основе (1) (см. в частности рис.4а). Вычисленная и определенная по экспериментальным данным зависимость эффективной толщины d_{eff} от солености воды при контактных измерениях ($h = 0$) вместе с аналогичной зависимостью скин-слоя поглощения d_{sk} представлены на рис.4б. Существенное различие между d_{eff} и d_{sk} является наиболее очевидным проявлением ближнепольного эффекта. Эти экспериментальные результаты доказывают наличие ближнепольной компоненты в принимаемом тепловом излучении среды [3].

4. Восстановление подповерхностного температурного профиля

Обнаруженная зависимость $d_{\text{eff}}(D, h)$ может быть использована для развития новых методов радиотепловой диагностики среды. В данной работе представлены первые результаты восстановления подповерхностного профиля температуры водной среды по измеренной зависимости $d_{\text{eff}}(D)$. Яркостная температура воды измерялась с использованием двух антенн размером $D = 1$ см и 4 см в процессе нагрева водной поверхности проволочным нагревателем (см. рис.5а). Дополнительно к этим измерениям (рис.5а) для восстановления профиля использовались прямые измерения поверхностной температуры воды $T(z=0)$ в качестве данных при нулевом размере антенны $D = 0$, поскольку $T_b(D=0) = T(z=0)$. Алгоритм и программа для восстановления $T(z)$ из решения интегрального уравнения (1) был разработан на основе теории некорректных обратных задач Тихонова [4]. Восстановленные профили $T(z)$ в процессе нагрева поверхностного слоя воды показаны на рис.5б вместе с профилями, полученными путём контактных измерений температуры. Можно видеть, что точность восстановления $T(z)$ составила $\sim(0.5-1)$ К при $0 < z < d_{\text{sk}} \approx 4$ см.

5. Заключение

Дальнейшее развитие предлагаемого подхода может быть связано с увеличением чувствительности радиометрической системы на высотах антенны $h > h_{\text{max}}$ (в наших измерениях $h_{\text{max}} = 2.5$ мм), а также с уменьшением размера антенн (в область размеров $D < 1$ см). Для увеличения высоты необходимо добиться согласования антенны на произвольной высоте, что не является принципиальной проблемой. Однако КПД электрически малых антенн неизбежно уменьшается с ростом h/λ и уменьшением D/λ . Воз-

можным подходом к решению этой проблемы является улучшение конструкции миниатюрных антенн и использование материалов с предельно низкими омическими потерями, таких как высокотемпературные сверхпроводники. Эффективность этих материалов с точки зрения миниатюризации антенн исследовалась в [5,6]. Наши предварительные оценки показывают, что ближнепольные радиометрические измерения возможны в интервале высот антенны $0 < h/\lambda < 0.1$ и при размерах $D/\lambda > 0.01$. Тогда эффективную толщину слоя, в котором формируется принимаемое излучение, можно будет варьировать в диапазоне $0.2d_{sk} < d_{eff} < d_{sk}$. Предложенный метод одноволнового подповерхностного зондирования температуры может оказаться более простым в практической реализации по сравнению с известными многочастотными методами [7].

Литература

1. Резник А.Н. Квазистационарное поле теплового излучения в теории контактной радиотермометрии. //Изв. вузов. Радиофизика, 1991, т.34, N5, с.512-517.
2. Абрамов В.И., Резник А.Н. Миниатюризация вибраторной сверхпроводниковой антенны. // Изв. вузов. Радиофизика, 1999, т.42, N2, с.158-167.
3. Гайкович К.П., Резник А.Н. Эффект ближнего поля теплового радиоизлучения. Письма в ЖЭТФ, 2000, т.72, вып. 11, с.792-796.
4. К.Р.Gaikovich, A.N.Reznik. Near-field subsurface radiothermometry. 8-th International Conf. "Microwave and Telecommunication Technology" (Crimea, Ukraine, September 14-17, 1998, Sevastopol), Sevastopol: Veber Co., Conference Proceedings, v.2, pp.629-630.
5. Климов А.Ю., Красильник З.Ф., Резник А.Н., Абрамов В.И. и др. Миниатюрная высокотемпературная сверхпроводящая антенна СВЧ диапазона. //Сверхпроводимость: Физ., Хим., Техн., 1993, т.6, N11-12, сс.2150-2159.
6. Абрамов В.И., Климов А.Ю., Резник А.Н., Тагунов Б.Б. Электрически-малая плосковая антенна из высокотемпературного сверхпроводника. //Письма в ЖТФ, 1994, т.20, N19, сс.60-65.
7. Гайкович К.П., Сумин М.И., Троицкий Р.В. Определение глубинного профиля температуры методом многочастотной радиотермографии в медицинских приложениях. //Изв. вузов. Радиофизика, 1988, т.31, N9, с.1104-1112.

Подписи к рисункам

Рис.1. Схема ближнепольной антенны. 1 – электрически короткие диполи; 2 – согласующий резонатор; 3 – диэлектрическая шайба для тонкой настройки; 4 – коаксиально-полосковый переход.

Рис.2. Частотная зависимость коэффициента отражения антенны для различных высот над поверхностью водной среды.

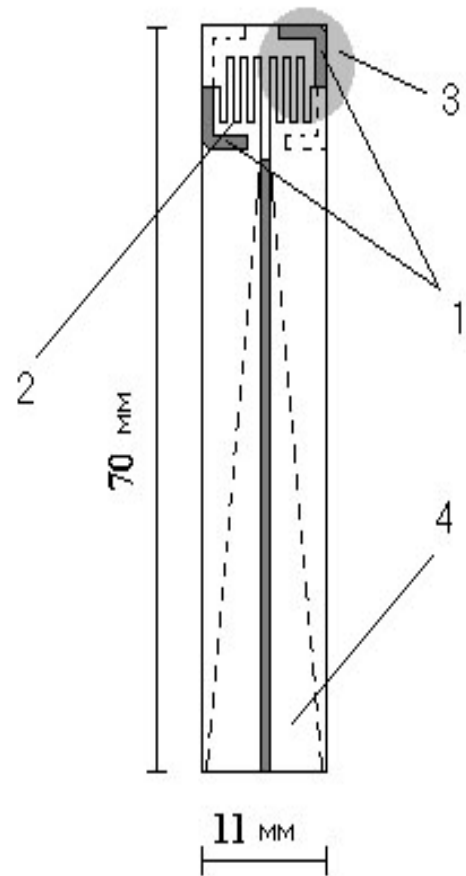
Рис.3. Схема измерительной установки.

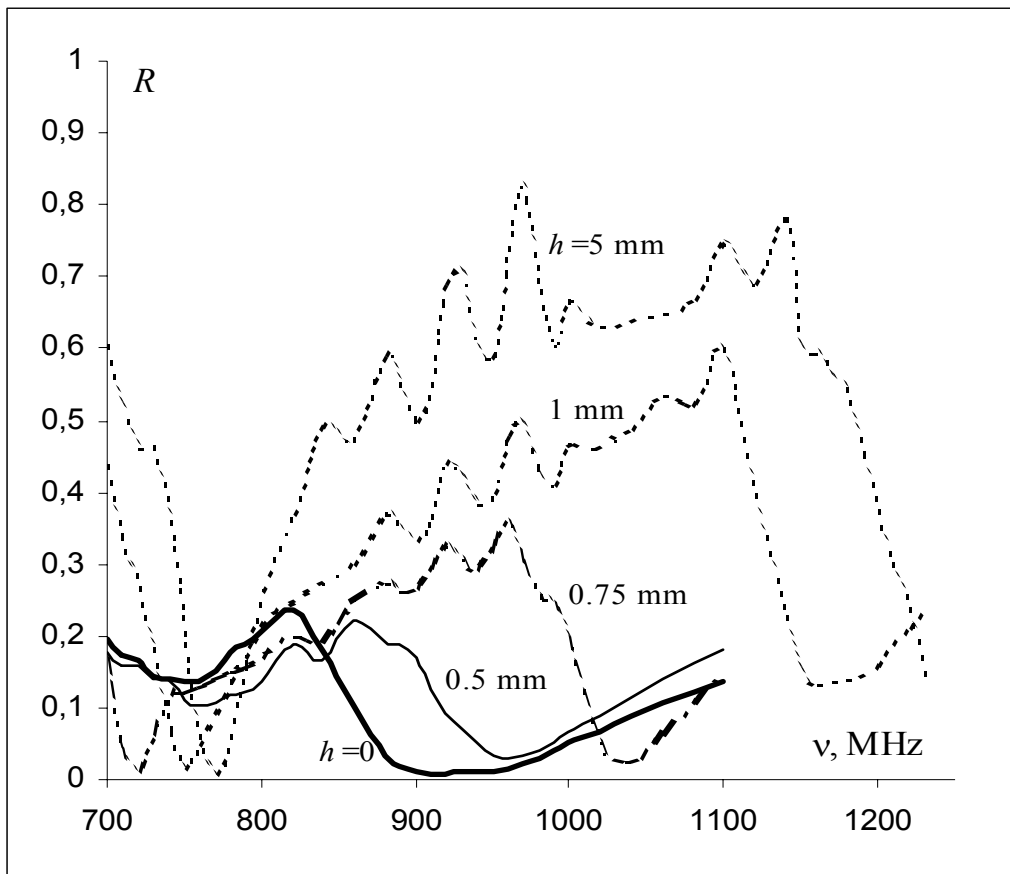
Рис.4.

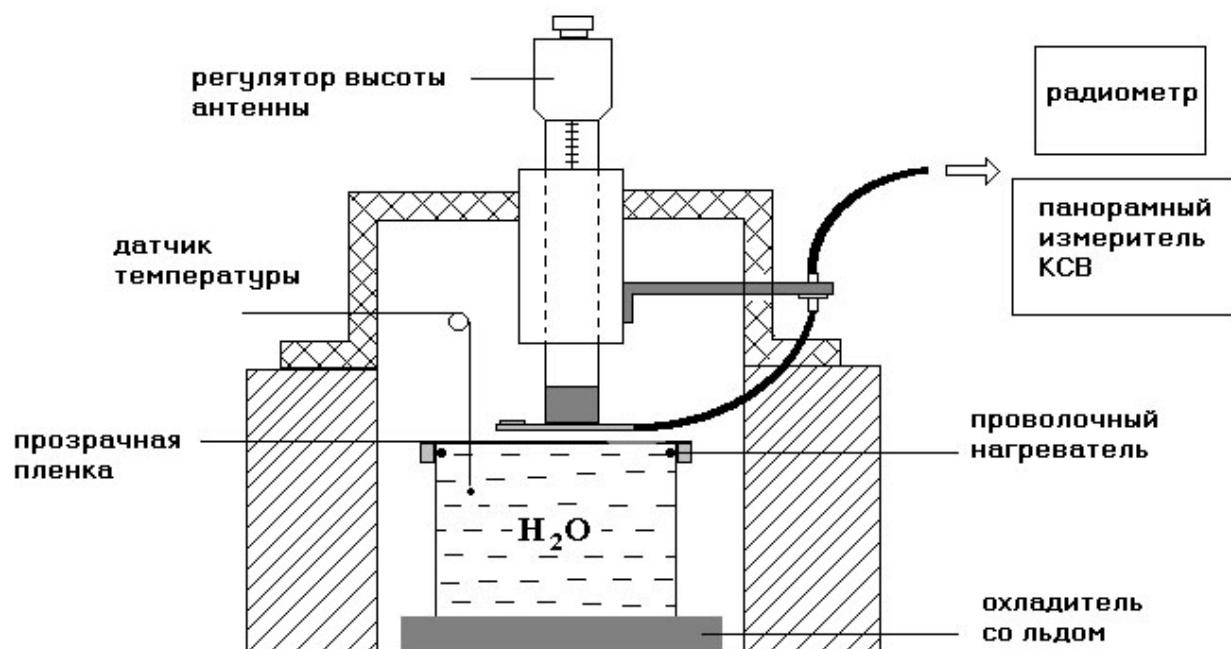
- a) Эффективная толщина d_{eff} в зависимости от высоты антенны при различных размерах антенны. Кружки - измерения; линии – результаты расчетов.
- b) Измеренная (кружки) и рассчитанная (пунктир) зависимость d_{eff} от солености воды. Сплошная линия – вычисленная зависимость толщины скин-слоя поглощения.

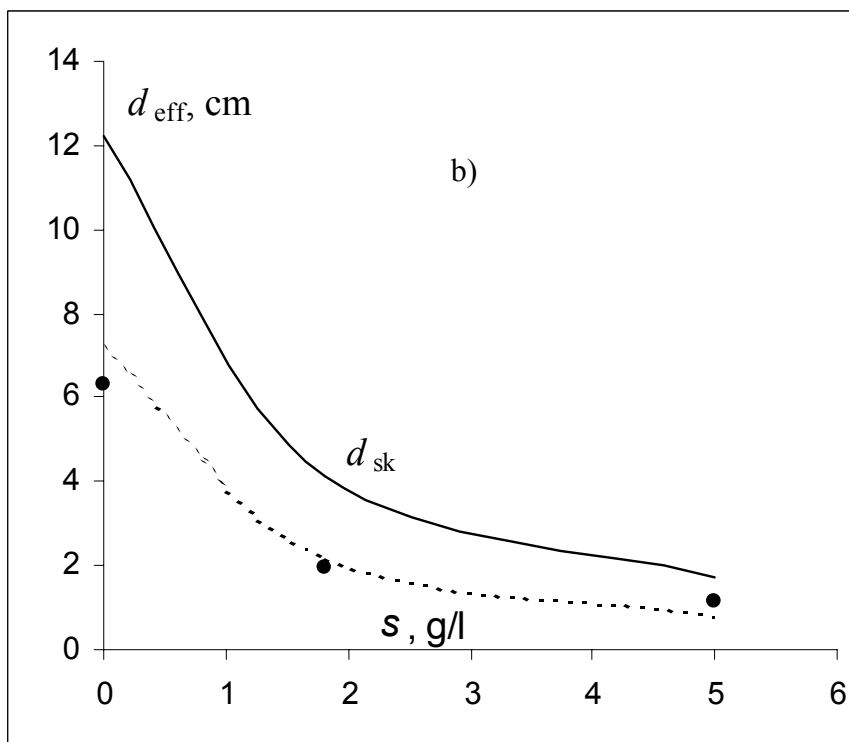
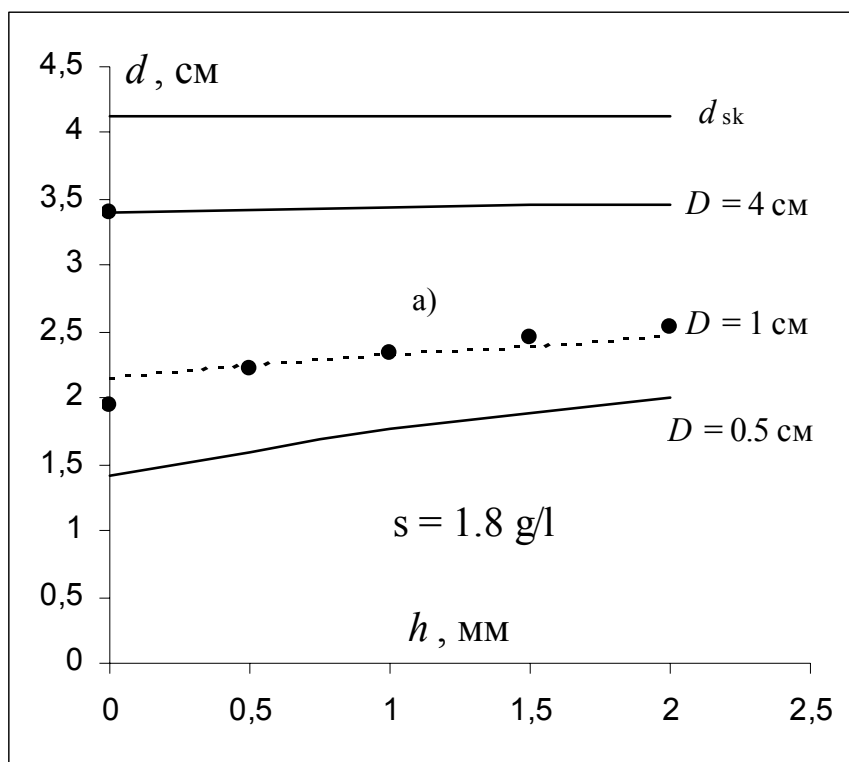
Рис.5.

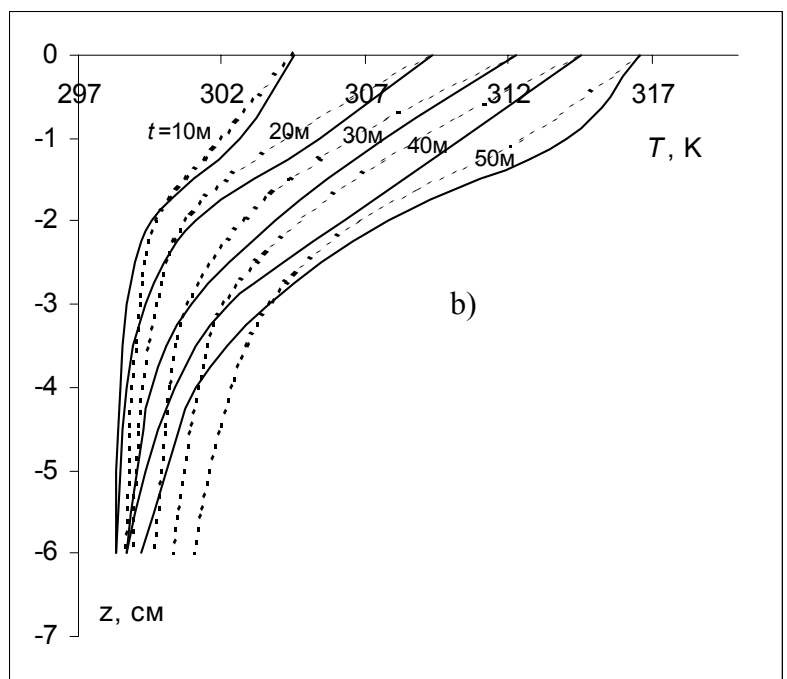
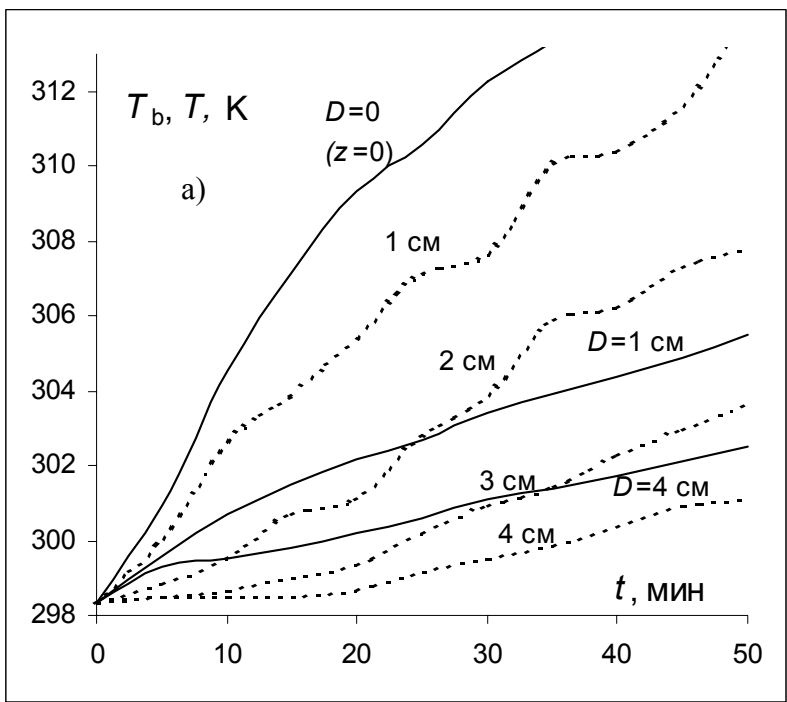
- a) Измерения динамики яркостной температуры (сплошные линии) и прямые измерения динамики температуры на различных уровнях в толще воды (пунктир).
- b) Профили $T(z)$, восстановленные с интервалом 10 s по измерениям $T_b(D)$ – пунктирные линии; профили $T(z)$, измеренные контактным термометром - сплошные.











Обнаружен эффект ближнего поля в тепловом радиоизлучении поглощающей среды. Эффект состоит в том, что эффективная толщина слоя формирования принимаемого излучения d_{eff} оказывается меньше глубины скин-слоя d_{sk} и зависит от размера приемной антенны D и ее высоты над поверхностью среды h . Зависимость $d_{\text{eff}}(D, h)$ получена из измерений излучения температурно стратифицированной водной среды на длине волны 31 см с использованием специально разработанной антенны малых электрических размеров. Приводятся измеренные радиофизические характеристики антенны. Предлагается использовать измерения зависимости принимаемого излучения от D и h , как новый источник информации о глубинном распределении температуры. Развита методика решения соответствующих обратных задач и получены первые результаты восстановления подповерхностного температурного профиля водной среды.

Near field subsurface microwave radiometry. V.L.Vaks, K.P.Gaikovich, A.N.Reznik, N.V.Yurasova.

The near field effect has been discovered in thermal radio emission of lossy media. The effect consist in the fact that the effective depth of the received emission formation layer d_{eff} appears less than the skin-layer depth and depends on the size of receiver antenna and its height above the medium surface h . The dependence $d_{\text{eff}}(D, h)$ has been obtained from measurements of the emission of temperature stratified water medium at wavelength 31 cm using a specially developed electrically small antenna. The results of experimental research of antenna parameters are presented. Authors propose to use measurements of received emission dependence on D and h as a new source of information about depth temperature distribution. Methods of the solution of corresponding inverse problems have been developed and the first results of subsurface temperature profile retrieval in the water medium have been obtained.

Сведения об авторах:

Место работы: Институт физики микроструктур РАН, ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, факс: 8312-6755553.

1. Вакс Владимир Лейбович, зав. отд. ИФМ РАН, т. 8312-607648, e-mail: vax@ipm.sci-nnov.ru. Паспорт V-ТН № 620646, выдан РОВД Нижегородского района г. Горького 27.04.1978 г., прописан 603006, Нижний Новгород, ул. Горького, д.152-а, кв.130.
2. Гайкович Константин Павлович, д.ф.-м.н., в.н.с. ИФМ РАН, т. 8312-327920, e-mail: gai@ipm.sci-nnov.ru. Паспорт X-ТН №549639, выдан РОВД Нижегородского района г. Горького 19.02.1980 г., прописан 603093, Нижний Новгород, ул. Родионова, д.7, кв.47.
3. Резник Александр Николаевич, д.ф.-м.н., в.н.с. ИФМ РАН, т. 8312-675037, e-mail: reznik@ipm.sci-nnov.ru. Паспорт X-ТН №598599, выдан УВД Дзержинского горисполкома Горьковской обл., 15.08.1980 г., прописан 606000, Нижегородская обл., г. Дзержинск, пр. Ленина, д.80, кв.9.
4. Юрасова Надежда Валерьевна, ст. лаборант-исследователь ИФМ РАН, т. 8312-675037, e-mail: reznik@ipm.sci-nnov.ru. Паспорт XIX-ТН №504942, выдан РОВД Автозаводского района г. Нижнего Новгорода 6.10.1995 г., прописан 603142, Нижний Новгород, ул. Мончегорская, д.16-а, корп.2, кв.80.

Адрес:

107076, Москва, Стромьинский пер., 4,издательство "Машиностроение",
редакция журнала "Микросмстемная техника".