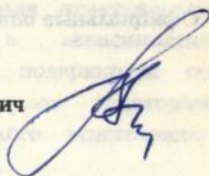


**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ РАДИОФИЗИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ**

На правах рукописи

Комяк Владимир Александрович




**КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИРОДНОЙ
СРЕДЫ МЕТОДАМИ АКТИВНОЙ И ПАССИВНОЙ
РАДИОЛОКАЦИИ**

(01.04.03 - радиофизика)

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико - математических наук**



Харьков - 1994

ДВ 30.944

ЛНБ України ім. В. Стефаніка
00777760 (У)

Диссертация является рукописью

Работа выполнена в Ордена Трудового Красного Знамени
Институте радиопизики и электроники НАН Украины

Научный руководитель доктор физико - математических наук,
профессор КАЛМЫКОВ Анатолий Иванович

Официальные оппоненты: - доктор физико - математических наук,
профессор ГОРОБЕЦ Николай Николаевич

- кандидат технических наук, старший
научный сотрудник БЫКОВ Виктор Ни-
колаевич

Ведущая организация - Радиоастрономический институт
НАН Украины, г. Харьков

Защита состоится *15 сентября* 1994г. в *15⁰⁰* часов на заседа-
нии Специализированного совета Д016.64.01 при Институте радио-
физики и электроники НАН Украины (310085, Харьков - 85,
ул. Академика Проскуры, д.12, конференц - зал)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ НАН
Украины.

Автореферат разослан *15 сентября* 1994г.

Ученый секретарь
Специализированного совета
доктор физ.- мат.наук

К.А.Лукин

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

Общая характеристика работы

Актуальность. Освоение Мирового океана, в том числе его арктических и антарктических районов, является важной задачей, для успешного решения которой необходимо обеспечить получение значительного количества информации о состоянии поверхности океана и ледяных покровах.

Использование методов активной и пассивной радиолокации для дистанционного зондирования поверхности океана и ледяных покровов позволяет решать широкий круг задач практической океанографии. Однако, неоднозначности в зависимостях радиофизических характеристик исследуемой поверхности от метеопараметров и свойств среды накладывают некоторые ограничения на эффективность радифизического мониторинга Мирового океана.

Актуальность темы диссертационной работы определяется необходимостью разработки новых, более эффективных методов и средств дистанционного зондирования поверхности океана и ледяных покровов с аэрокосмических носителей для Государственной космической эксплуатационной системы исследования природной среды.

Целью работы является исследование возможностей повышения эффективности радиофизических методов зондирования природной среды с аэрокосмических носителей и внедрение этих методов в практику мониторинга поверхности океана и ледяных покровов.

Задачи исследования:

- исследование особенностей применения методов активной и пассивной радиолокации в дистанционном зондировании поверхности океана и ледяных покровов с аэрокосмических носителей и разработка на их основе нового метода зондирования;
- экспериментальная проверка реализуемости предложенного метода бортовой аппаратурой аэрокосмических носителей; выработка рекомендаций для создания глобальной системы оперативного всепогодного зондирования поверхности океана и ледяных покровов.

Научная новизна диссертационной работы:

- проведены экспериментальные исследования свойств радиолокационных отражений и собственного радиотеплового излучения

поверхности океана и ледяных покровов с аэрокосмических носителей и на основе полученных результатов показано, что раздельное применение методов активной и пассивной радиолокации в дистанционном зондировании природной среды во многих случаях ограничивает их эффективность и может приводить к ошибкам интерпретации получаемых ими данных;

- разработан и экспериментально исследован метод дистанционного зондирования поверхности океана и ледяных покровов, основанный на совместном использовании синхронных данных об удельной эффективной поверхности рассеяния и интенсивности собственного радиотеплового излучения одних и тех же участков исследуемой поверхности в широкой полосе обзора, показана его эффективность для определения степени развитости волнения в океане, показана возможность обнаружения зон развивающегося (затухающего) волнения по пространственному смещению их проявлений на синхронных радиолокационном и радиотепловом изображениях поверхности океана;

- разработан и экспериментально проверен метод идентификации разливов нефтепродуктов на фоне неоднородностей морского волнения, вызванных процессами взаимодействия океана и атмосферы и внутри океаническими процессами;

- разработан метод комплексного зондирования ледяных покровов, позволяющий существенно повысить достоверность определения возрастных характеристик льда, показаны его возможности по распознаванию трещин и развоидий, свободных от льда;

- исследованы возможности дистанционного зондирования ледниковых покровов Земли с помощью радиофизических средств, устанавливаемых на аэрокосмических носителях. Выявлены общие для различных зон земного шара закономерности, определяющие влияние климатических условий на уровни радиосигналов, формируемых ледниковыми покровами.

Практическая значимость работы

Разработан новый метод дистанционного зондирования природной среды с аэрокосмических носителей, позволивший существенно повысить достоверность интерпретации результатов.

Обоснованы требования к характеристикам комплексов радиофизической аппаратуры, реализующих разработанный метод, предложены пути их построения.

Созданы экспериментальные образцы комплексов, позволившие провести апробацию предложенного метода с борта самолета - лаборатории и ИСЗ "Космос - 1500" и "Космос - 1602".

Реализована на практике и внедрена в серийное производство система метеорологического зондирования, обеспечивающая получение в широкой полосе обзора синхронных данных о радиолокационных, радиотепловых и оптических характеристиках исследуемой среды, с оперативной (в реальном масштабе времени) обработкой информации на борту ИСЗ и передачей ее на широкую сеть приемных пунктов.

Обоснованность и достоверность полученных в работе научных результатов, выводов и рекомендаций определяется использованием в их основе общепризнанных методов статистической радиофизики, всесторонне испытанных моделей излучения и рассеяния радиоволн морской поверхностью, значительным объемом экспериментальных данных о радиофизических характеристиках ледяных покровов.

Эффективность предложенных методов и рекомендаций подтверждается значительным объемом испытаний реализующей их аппаратуры на борту самолета-лаборатории ИЛ-18 и искусственных спутников Земли "Космос - 1500", "Космос - 1602", "Космос - 1766", "Космос- 1869" и ИСЗ серии "Океан".

Апробация работы. Основные результаты исследований по теме диссертационной работы были представлены на Всесоюзных конференциях по распространению радиоволн (Ленинград, 1984г.; Алма-Ата, 1987г.), Всесоюзных семинарах " Неконтактные методы измерения океанографических параметров " (Одесса, 1981г.; Москва, 1983г.), Всесоюзной конференции по статистическим методам обработки данных дистанционного зондирования окружающей среды (Рига, 1986г.), XVI Международной научно - технической конференции по радиосвязи и радионавигации (Санкт - Петербург, 1992г.).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 17 печатных работах. Новизна методов и технических решений защищена 4 авторскими свидетельствами. При

этом автором в них предложен и обоснован комплексный метод зондирования, / 1 - 4 /, определены оптимальные параметры радиометрической аппаратуры / 2, 10 /, обоснованы физические механизмы, определяющие эффективность предложенного метода / 3 - 7 /, получен ряд экспериментальных данных по характеристикам излучения и рассеяния льдов различного возраста / 1, 4, 6, 7 /, по азимутальным зависимостям коэффициента излучения морской поверхности / 3, 5 /, по взаимным пространственным сдвигам откликов радиолокационного и радиометрического каналов на изменение скорости ветра / 3 /, по климатическим изменениям уровней радиосигналов, формируемых ледниковыми покровами / 2, 8, 9 /, предложены физические модели, объясняющие эти результаты. Предложены структурные алгоритмы совместной тематической обработки синхронных радиоизображений / 2 - 4, 9 /.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и содержит 111 страниц основного текста, 71 рисунок на 68 страницах, 2 таблицы и список литературы из 146 наименований на 17 страницах. Общий объем работы - 196 страниц.

Во введении отражена актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследований, основные научные результаты и практическая значимость работы.

В первом разделе "Радиофизические методы исследования поверхности океана" на основании связей характеристик рассеяния и излучения с параметрами волнения проведен анализ возможностей исследования состояния поверхности океана и поля приводного ветра методами активной и пассивной радиолокации.

Многочисленные исследования показали, что рассеяние радиоволн морской поверхностью имеет избирательный характер и основная энергетическая характеристика рассеяния - удельная эффективная поверхность рассеяния (УЭПР) σ^0 - пропорциональна спектральной плотности волнения $S(\kappa_0)$ в области волновых чисел κ_0 , связанных с длиной радиоволны λ зависимостью $\kappa_0 = (4\pi \sin \theta) / \lambda$, где θ - угол падения.

Анализ зависимости $\sigma^0(W)$, связывающей УЭПР σ^0 со скоростью ветра ($\sigma^0 \sim W^{0.8}$), показывает, что чувствительность радиолокационного метода к изменению скорости ветра уменьшается с ростом скорости ветра.

Радиояркая температура морской поверхности определяется, в основном, степенью покрытия поверхности пеной. Влияние собственно ветрового волнения на радиояркую температуру морской поверхности много слабее. Обнаруженная в процессе эксперимента " Беринг " связь степени покрытия поверхности пеной μ со скоростью ветра $\mu \sim W^2$ показывает, что чувствительность радиояркой температуры к изменению скорости ветра увеличивается с возрастанием W , и при $W > 10 \text{ мс}^{-1}$ составляет $1-1.5 \text{ К} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-1}$.

На рис.1 приведены зависимости чувствительности радиолокационного $d\sigma^0/dW$ и радиометрического dT_n/dW методов от W , нормированные на свое максимальное значение, для диапазона скоростей приводного ветра $W \in \{2...20\} \text{ мс}^{-1}$.

Анализ азимутальных зависимостей уровней рассеянного и радиотеплового сигналов от скорости ветра показывает, что при неопределенности его направления погрешности радиолокационных методов определения скорости ветра увеличиваются с ростом W , а радиотеплового - уменьшаются.

Таким образом, комплексное использование методов уменьшает погрешности дистанционного определения поля скоростей приводного ветра за счет сочетания высокой точности радиолокационного метода при малых скоростях ветра и радиотеплового - при больших.

Совместный анализ данных дистанционного зондирования, синхронно получаемых средствами активной и пассивной радиолокации, позволяет обнаруживать на морской поверхности зоны развивающегося (затухающего) волнения, судить о динамике поля скоростей приводного ветра и определять глобальное направление ветра в исследуемом районе по пространственному сдвигу откликов активного и пассивного каналов, связанному с различными временами изменения характеристик ряби и пенного покрова при вариациях скорости ветра.

На поверхности океана всегда существуют зоны, в которых статистические характеристики морской поверхности существенно отличаются от окружающих участков. Методы активной радиолокации позволяют достаточно надежно обнаруживать эти зоны. Комплексное же использование радиолокационной и радиотепловой информации позволяет не только обнаруживать, но и

выделять среди них неоднородности, связанные с разливами нефтепродуктов, за счет реакции радиотеплового канала на изменение диэлектрических свойств среды, вызванное наличием пленки нефтепродукта.

Второй раздел "Дистанционное зондирование ледяных покровов" посвящен исследованию возможностей определения характеристик ледяного покрова методами активной и пассивной радиолокации.

На основе анализа полученных экспериментальных данных по характеристикам излучения и рассеяния радиоволн ледяными покровами определен наиболее вероятный ход зависимостей σ^0 и T_a от возраста (толщины) морского льда (рис.2).

Проведен анализ влияния снежного покрова на излучательные характеристики льда. Показано, что уменьшение излучательной способности однолетних морских льдов связано не столько с ростом их толщины, сколько с увеличением толщины снежного покрова с возрастом льда. Результаты расчетов радиотепловых контрастов лед-вода, проведенных в рамках модели радиотеплового излучения слоистой среды, показывают, что влияние снежного покрова на излучательные характеристики льдов возрастает с укорочением длины волны и в коротковолновой части миллиметрового диапазона может приводить даже к изменению знака контраста.

Исследовано влияние процессов объемного рассеяния на уровне радиосигналов, формируемых ледяным покровом. Показано, что эффекты объемного рассеяния на неоднородностях диэлектрической проницаемости деятельного слоя определяют высокую УЭПР σ^0 и низкую излучательную способность (а, следовательно, и низкую радиояркостную температуру T_a) многолетних льдов и ледниковых покровов. При малых флуктуациях диэлектрической проницаемости $\delta\epsilon/\epsilon \ll 1$, когда применимо борновское приближение, рассеянный сигнал пропорционален пространственному спектру флуктуаций ϵ , в силу чего наблюдается существенная зависимость уровня рассеянного сигнала от размеров частиц, т.е. морфологической структуры ледникового покрова. В рамках первого приближения теории многократного рассеяния проводится интерпретация космических радиоизображений ледниковых покровов. Выявлены общие для различных районов

Земного шара закономерности, определяющие влияние климатических условий на уровни радиосигналов, формируемых ледниковым покровом. Оценивается влияние пленки воды на зернах фирна на уровни радиосигналов.

Показано, что при раздельном применении методов активной и пассивной радиолокации для определения характеристик ледяных покровов (возраст, граница распространения, трещины, развода и т.д.) неоднозначности в зависимостях σ^0 и T_{λ} от возраста льда (см. рис.2) накладывают ряд ограничений, снижающих достоверность интерпретации результатов.

Эти ограничения можно существенно уменьшить при комплексном применении этих методов. На рис.3 представлено корреляционное поле значений $\sigma^0(\lambda=3 \text{ см})$ и $T_{\lambda}(\lambda=0.8 \text{ см})$ для льдов различного возраста (Н - нилас, СЛ - серый лед, СБЛ - серо-белый лед, БЛ - белый лед, ОЛ - однолетний лед, МЛ - многолетний лед).

Совместный анализ синхронных данных о рассеянии и излучении исследуемых ледяных покровов позволяет выделять в системе трещин и разводий участки, свободные от льда.

В третьем разделе " Требования к комплексу аппаратуры дистанционного зондирования и их техническая реализация " проведен анализ спектральных и угломестных зависимостей характеристик рассеяния и излучения поверхностью океана и ледяными покровами.

Показано, что система дистанционного зондирования, состоящая из радиолокатора бокового обзора, сканирующего радиометра и радиотелевизионного устройства оптического диапазона позволяет решать большинство задач практической океанографии с борта ИСЗ. При этом показано, что наибольшей информативностью обладает радиолокационная система, работающая в диапазоне $\lambda \sim 3...5 \text{ см}$, что подтверждено экспериментами с КРБО ИСЗ " Космос - 1500 ". Оптимальность характеристик оптического канала исследовалась в программе " Метеор ".

В разделе 3.1. проведен выбор параметров радиотеплового канала. Анализ выражения для коэффициента излучения морской поверхности при наличии пенного покрова

$$\epsilon_{\Sigma} = \epsilon_0(1-s) + \epsilon_n \cdot s$$

(где s - относительная площадь пенных образований в элементе разрешения радиометра, e_n и e_n - коэффициенты излучения водной поверхности и пены соответственно) показывает, что максимальная крутизна

$$\frac{de_{\Sigma}}{dW}(\lambda) = A_w [e_n(\lambda, \theta) - e_n(\lambda, \theta)],$$

а, следовательно, и наибольшая точность определения скорости ветра, наблюдается в диапазоне, соответствующем максимуму значения $e_n(\lambda, \theta) - e_n(\lambda, \theta)$. В соответствии с рис.4, на котором сплошной

линией приведена зависимость $B_w = \frac{dT_{\Sigma}}{dW}(\lambda)$, а пунктирной линией - значения распознаваемости $\Pi(\lambda)$, представляемой в виде произведения модулей радиотепловых контрастов различных типов льдов на фоне воды и между собой, оптимальным для решения задач практической океанографии является диапазон $\lambda \sim 0.8...1$ см.

Проведенный в разделе 3.1 анализ позволил сформулировать рекомендации по построению аппаратуры, реализующей предлагаемый метод комплексного зондирования. Показано, что для обеспечения максимальной информативности системы дистанционного зондирования океанографических ИСЗ комплекс радиофизической аппаратуры должен обеспечивать измерение УЭПР исследуемой поверхности на $\lambda \sim 3$ см при вертикальной поляризации излучения радиоволн и измерение интенсивности горизонтально поляризованного собственного радиоизлучения на $\lambda \sim 0.8$ см. Совместная полоса обзора приборов комплекса должна соответствовать углам падения $\theta \in \{20^\circ...60^\circ\}$.

Выработанные рекомендации реализованы в системе дистанционного зондирования, разработанной в ИРЭ НАН Украины. В разделе 3.2 приведено описание этой системы. Испытания, проведенные с борта ИСЗ "Космос - 1602", подтвердили эффективность разработанного комплексного метода, правильность рекомендаций и предложенных технических решений.

Анализ радиоизображений, получаемых с борта ИСЗ средствами активной и пассивной радиолокации, проведенный в разделе 3.3,

показал широкие возможности радиофизических методов. Обсуждаются также перспективы использования разработанного комплексного метода при дистанционном зондировании земных покровов.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

- разработан и экспериментально исследован новый метод дистанционного зондирования поверхности океана и ледяных покровов, основанный на совместном использовании синхронных данных об удельной эффективной поверхности рассеяния и интенсивности собственного радиотеплового излучения одних и тех же участков зондируемой поверхности в широкой полосе обзора:

- Показана эффективность разработанного метода для определения поля скоростей приводного ветра, обнаружения зон развивающегося (затухающего) волнения по пространственному смещению их проявлений на синхронных радиолокационном и радиотепловом изображениях поверхности и возможность использования этих данных для определения глобального направления приводного ветра.

- Разработан и экспериментально проверен метод идентификации разливов нефтепродуктов на фоне неоднородностей морского волнения, вызванных внутритропическими процессами и процессами взаимодействия океана и атмосферы.

- Разработан метод комплексного зондирования ледяных покровов, позволяющий повысить достоверность определения возрастных характеристик льда. Показаны возможности метода по обнаружению трещин и разводий и распознаванию участков, свободных от льда.

- Исследованы возможности дистанционного зондирования ледниковых покровов Земли с помощью радиофизических средств, устанавливаемых на аэрокосмических носителях. Выявлены общие для различных зон Земного шара закономерности, определяющие влияние климатических условий на уровни радиосигналов, формируемых ледниковыми покровами.

- Обоснованы оптимальные параметры аппаратуры, реализующей предложенный метод, разработаны пути ее технической реализации.

- Созданы экспериментальные образцы комплексов аппаратуры.

Проведены испытания методов и аппаратуры с борта самолета-лаборатории и ИСЗ "Космос - 1500" и "Космос - 1602". Выработаны рекомендации для создания аппаратуры эксплуатационной системы зондирования.

- Разработанные методы, рекомендации и технические решения внедрены в серийную аппаратуру эксплуатационной системы, прошедшей испытания на борту ИСЗ "Космос - 1766", "Космос - 1869" и принятой в Государственную эксплуатацию на ИСЗ серии "Океан".

На защиту выносятся следующие положения:

1. Предложенный комплексный радиофизический метод дистанционного зондирования поверхности Земли с аэрокосмических носителей, основанный на совместном использовании синхронных данных об удельной эффективной поверхности рассеяния и интенсивности собственного радиотеплового излучения исследуемой поверхности в широкой полосе обзора, позволяет:

- повысить точность определения скорости приводного ветра средствами активной и пассивной радиолокации;

- обнаруживать по пространственному смещению на синхронных радиолокационном и радиотепловом изображениях зоны развивающегося (затухающего) волнения в океане;

- идентифицировать разливы нефтепродуктов на фоне неоднородностей морского волнения естественного происхождения;

- повысить достоверность интерпретации результатов радиофизического зондирования ледяных покровов.

2. Для обеспечения максимальной эффективности разработанного метода зондирования комплекс радиофизической аппаратуры должен проводить измерение удельной эффективной поверхности рассеяния в диапазоне длин волн $\lambda \sim 3...5$ см при вертикальной поляризации излучения и приема и измерение значений радиояркостной температуры горизонтально поляризованного излучения на длине волны $\lambda \sim 0.8...1$ см в диапазоне углов падения $\theta \in \{20^\circ...60^\circ\}$ для обеих систем комплекса.

Основные публикации по работе:

1. Комплексные радиофизические исследования ледовых покровов / В.П.Шестопалов, Б.Е.Хмыров, В.А.Комяк и др. // Доклады АН СССР, 1983. 272,- N 3, - С. 598 - 600.

2. Комплексные исследования природной среды Земли радиофизическим методом. / В.П.Шестопалов, А.И.Калмыков, В.А.Комяк и др. // Доклады АН СССР, 1985. 284, - N 1, - С. 98-102.

3. Исследование поверхности океана радиофизическими средствами с аэрокосмических носителей / В.Б.Ефимов, А.И.Калмыков, В.А.Комяк и др. // Изв. АН СССР. Физика атмосф. и океана, 1985. 21, - N 4, - С. 349-357.

4. Исследование ледяных покровов радиофизическими средствами с аэрокосмических носителей / В.Б.Ефимов, А.И.Калмыков, В.А.Комяк и др. // Изв. АН СССР. Физика атмосф. и океана, 1985. 21, - N 5, - С.512-520.

5. Особенности дистанционного зондирования поверхности океана при совместном использовании активных и пассивных радиофизических средств. / В.Б.Ефимов, А.И.Калмыков, В.А.Комяк и др. // Неконтактные методы и средства измерения океанограф. параметров. М.: Гидрометеоиздат, 1986. - С. 57-60.

6. Дистанционные исследования морских льдов комплексным радиолокационно-радиометрическим методом / А.С.Гавриленко, В.Б.Ефимов, В.А.Комяк и др. // Неконтактные методы и средства измерения океанограф. параметров. М.: Гидрометеоиздат, 1986. - С. 130-134.

7. Пичугин А.П., Комяк В.А., Малышенко Ю.И. Влияние атмосферы и снежного покрова на излучательные характеристики льдов. // Неконтактные методы и средства измерения океанограф. параметров. М.: Гидрометеоиздат, 1986. - С. 119-123.

8. Радиолокационные методы исследования природной среды и их испытания с ИСЗ "Космос - 1500". / В.П.Шестопалов, А.И.Калмыков, В.А.Комяк и др. // Космическая наука и техника, 1986. - N 1. - С. 25-34.

9. Исследование состояния ледниковых покровов Антарктиды с помощью радиофизической аппаратуры. / В.Б.Ефимов, В.А.Комяк, А.С.Курекин и др. // Исследование Земли из космоса, 1990. N 4. - С. 3-11.

10. АС 1111582(СССР). Способ дистанционного зондирования атмосферы и подстилающей поверхности Земли / В.П.Шестопалов, Ю.А.Афанасьев, В.А.Комяк и др. // 1983, N 3581264.

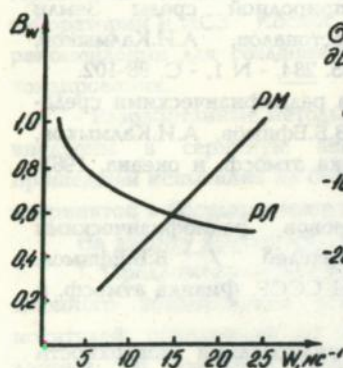


Рис. 1

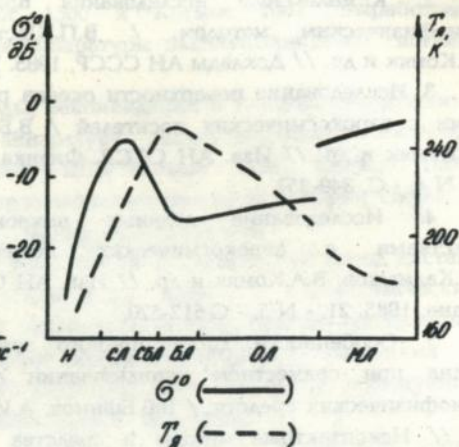


Рис. 2

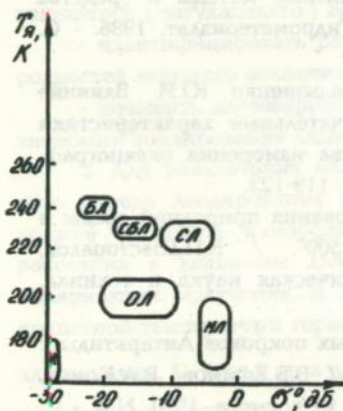


Рис. 3

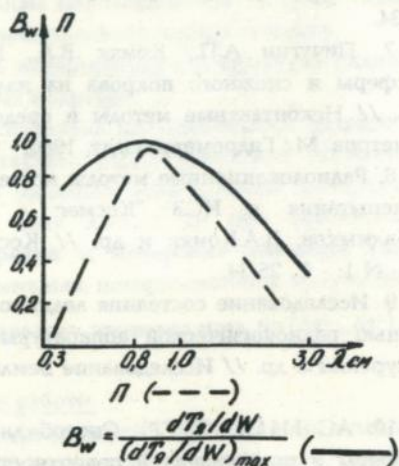


Рис. 4

УДК 621.372.01.02.01

Ав 30.945

Научное издание

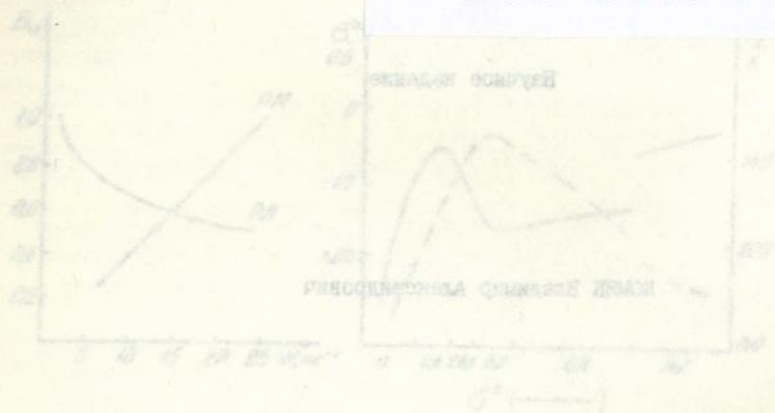
КОМЯК Владимир Александрович

КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИРОДНОЙ
СРЕДЫ МЕТОДАМИ АКТИВНОЙ И ПАССИВНОЙ
РАДИОЛОКАЦИИ

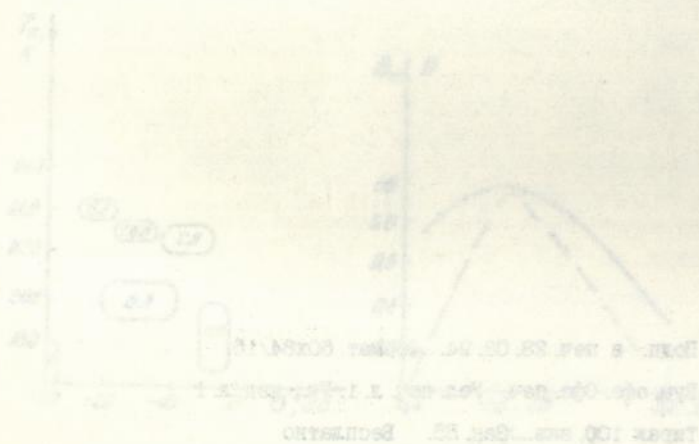
Подп. в печ. 23.08.94. Формат 60x84/16.
Бум. офс. Офс. печ. Усл. печ. л. 1. Уч. - изд. л. 1
Тираж 100 экз. Зак. 55. Бесплатно

Ротапринт ИРЭ НАН Украины
Харьков-85, ул. Академика Проскуры, 12

AB 30.944



ИЗВЕЩАНИЕ
О РАБОТАХ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ
ПРОЦЕССА
ИЗМЕНЕНИЯ



ИЗВЕЩАНИЕ
О РАБОТАХ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ
ПРОЦЕССА
ИЗМЕНЕНИЯ