

## НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ РУТЕНИЙ-ОКСИДНЫХ РЕЗИСТОРОВ

© 2021 г. С. А. Лемзяков<sup>а,\*</sup>, В. С. Эдельман<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН  
Россия, 119334, Москва, ул. Косыгина, 2

\*e-mail: lemserj@gmail.com

Поступила в редакцию 10.11.2020 г.

После доработки 16.11.2020 г.

Принята к публикации 17.11.2020 г.

Изготовлены и исследованы болометры на основе промышленных плоскостных резисторов. В диапазоне частот 200–400 ГГц при рабочей температуре 0.3 К они показали чувствительность на уровне  $6 \cdot 10^{-12}$  Ом/Вт (что при измерительном токе порядка 1 нА соответствует мощности поглощаемого излучения  $\sim 10$  пВт) в динамическом диапазоне около 30 дБ. Сравнивая величину отклика приемника на падающее излучение с реакцией на изменение его сопротивления при увеличении мощности постоянного тока, возможно определение абсолютной мощности поглощаемого излучения с точностью 10–20%. Постоянная времени используемых рутений-оксидных приемников в зависимости от толщины подложки составляет  $\sim 0.1$ –2 с.

DOI: 10.31857/S0032816221020282

### ВВЕДЕНИЕ

При исследовании низкотемпературных приемников субмиллиметрового диапазона существует проблема измерения падающей на них мощности излучения. Связано это с тем, что при применении работающих при комнатной температуре генераторов типа ламп обратной волны (л.о.в.) или лавинно-пролетных диодов излучение проходит по тракту, содержащему окна или волноводы и фильтры, подавляющие тепловое излучение комнаты.

Часто используются расположенные в непосредственной близости от изучаемых приемников нагреваемые до 3–15 К источники теплового излучения с фильтрами, выделяющими узкий спектральный диапазон. Во всех этих случаях при зазорах, сравнимых или больших длины волны, между элементами тракта и в его деталях возникают интерференционные явления. В волноводах и тепловых фильтрах присутствует поглощение, которое может зависеть от температуры. Эти трудно контролируемые процессы могут приводить к сильно изрезанной характеристике прохождения излучения и к ослаблению его потока. Поэтому желательнее как можно ближе к исследуемому образцам приемников помещать детекторы излучения с калибровкой по отклику на нагрев постоянным током. Такими приемниками могут служить дешевые плоскостные рутений-оксид-

ные резисторы [1], свойства которых ранее изучены при температурах  $T \sim 0.1$  К.

У толстопленочных рутений-оксидных резисторов сопротивление  $R$  быстро растет при понижении температуры в диапазоне 50 мК–1 К. Многолетний опыт массового использования подобных сопротивлений в качестве низкотемпературных термометров показывает, что их вольт-амперные характеристики практически не меняются ни от времени, ни при многократном термоциклировании. При низких температурах они чувствительны как к нагреву внешним излучением, так и к перегреву собственным измерительным током. Именно эта особенность позволяет использовать их в качестве болометров. Мощность, поглощаемую ими в поле излучения, можно определить, сравнивая изменение сопротивления приемника под воздействием излучения с изменением сопротивления при соответствующем нагреве протекающим током. Уровень поглощения и его зависимость от частоты вычисляются по электродинамическим характеристикам болометра. Результаты расчета приведены ниже (в работе [1] они не делались).

Болометр на основе рутений-оксидного резистора имеет при 0.1 К чувствительность порядка нескольких пиковатт. Однако при повышении температуры экспоненциально быстро падает значение  $dR/dT$  и одновременно пропорционально температуре растет теплопроводность подво-

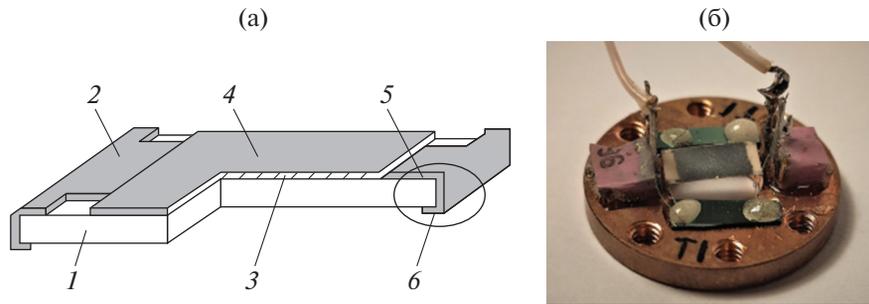


Рис. 1. а – схема устройства резистора: 1 – подложка; 2 – внутренние контакты из Ag–Pd; 3 – резистивный слой; 4 – защитный слой; 5 – слой никеля; 6 – внешние контактные площадки; б – внешний вид болометра.

дящих проводов. Целью данной работы было усовершенствовать конструкцию болометра и оценить его параметры при температуре порядка 0.3 К, достижимой в криостате откачки  $^3\text{He}$ , при которой эксперименты проводятся значительно чаще, чем при более низких температурах.

### КОНСТРУКЦИЯ БОЛОМЕТРА

В данной работе использовались резисторы Cinetech RMC-18. Информация об устройстве резисторов и используемых материалах была любезно предоставлена производителем и приведена в [1]. Схема резистора представлена на рис. 1а (по данным, полученным от изготовителя). Резистивный слой 3 толщиной 5 мкм из стекла с порошком оксида рутения нанесен на подложку из алюмооксидной керамики 1 с внутренними контактными площадками 2 из серебра с палладием, покрытыми слоем никеля 5. Резист закрыт защитным слоем 4 из стекла. На внутренние контактные площадки напаяны внешние контактные площадки 6 из олова. Стекланный защитный слой покрыт слоем из эпоксидной смолы с красителями.

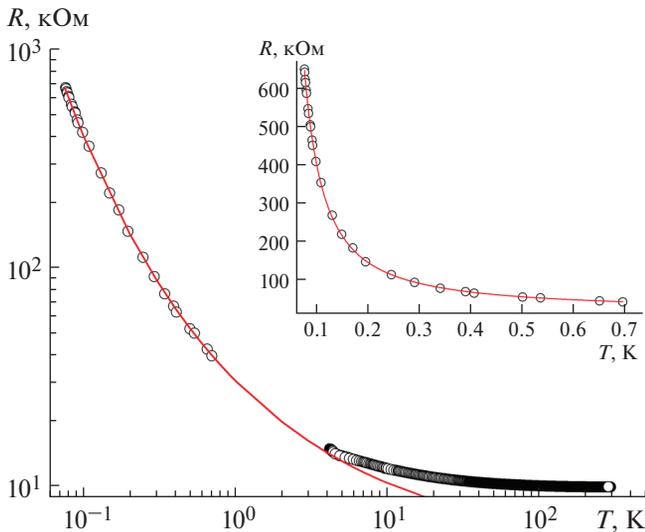
Для изготовления болометров использовались резисторы номиналом (при комнатной температуре) 10 кОм. При таком сопротивлении слоя поглощение высокочастотного излучения мало. Поэтому для лучшего согласования с полем излучения на тыльную сторону резисторов напылялись в вакууме пленки нихрома с сопротивлением 200–400 Ом/□. У некоторых резисторов предварительно сошлифовывалась керамическая подложка до толщины 0.1 мм для уменьшения теплоемкости болометров. Это в несколько раз уменьшает время отклика на изменение мощности падающего излучения. Резистор подвешивался в окне медного держателя на четырех проволочках Ø50 мкм из NiTi в мельхиоровой оболочке. К резистору они припаявались оловянно-свинцовым припоем. С другой стороны проволочки фиксировались эпоксидом на изолирующих кремниевых площадках толщиной 0.3 мм, приклеенных эпоксидом к медному держателю (рис. 1б). Длина

участков проволочек между резистором и местом фиксации на кремнии ~5 мм. Далее две из них соединялись с токоподводами. Медный держатель винтами крепился к холодному держателю образцов в криостате.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Работа болометра тестировалась в криостате на базе импульсной трубы с сорбционной откачкой паров  $^3\text{He}$ . Температура была на уровне ~0.3 К. Излучение л.о.в. вводилось по круглому волноводу из нержавеющей стали Ø3.4 × 0.2 мм длиной примерно 0.5 м. Для блокирования теплового излучения из комнаты в волноводе было установлено несколько пробок из материала Gore-Tex. На этой же установке проводились исследования СИНИС-приемников излучения (СИНИС – сверхпроводник–изолятор–нормальный металл–изолятор–сверхпроводник), имеющих чувствительность более чем на порядок выше, чем болометр с рутений-оксидным резистором. Было установлено, что при поднесении к входному фланцу волновода окисленного до черноты жала паяльника, нагретого выше ~500 К, отклика СИНИС-приемника на его тепловое излучение не наблюдалось. Таким образом, тепловое излучение комнаты ослаблено до такой степени, что не могло заметно повлиять на результаты.

Измерение мощности излучения л.о.в., поглощаемой болометром, проводилось следующим образом. Сначала для конкретного болометра при выключенной л.о.в. при малых токах  $I < 10$  нА, не вызывающих перегрева, определялась зависимость его сопротивления от температуры. Температура измерялась термометром LakeShore RX-102A (рис. 2). Отметим, что эта зависимость хорошо описывается законом Мотта  $R(T) = R_0 \exp(T_0/T)^x$  с параметрами  $R_0 = 4.8$  кОм,  $T_0 = 4.8$  К,  $x = 0.38$ . Такая зависимость характерна для рутений-оксидных резисторов [2]. Затем при установившейся температуре держателя  $T_{\text{exp}} \approx 0.3$  К измерялась вольт-амперная характеристика при токах до несколь-

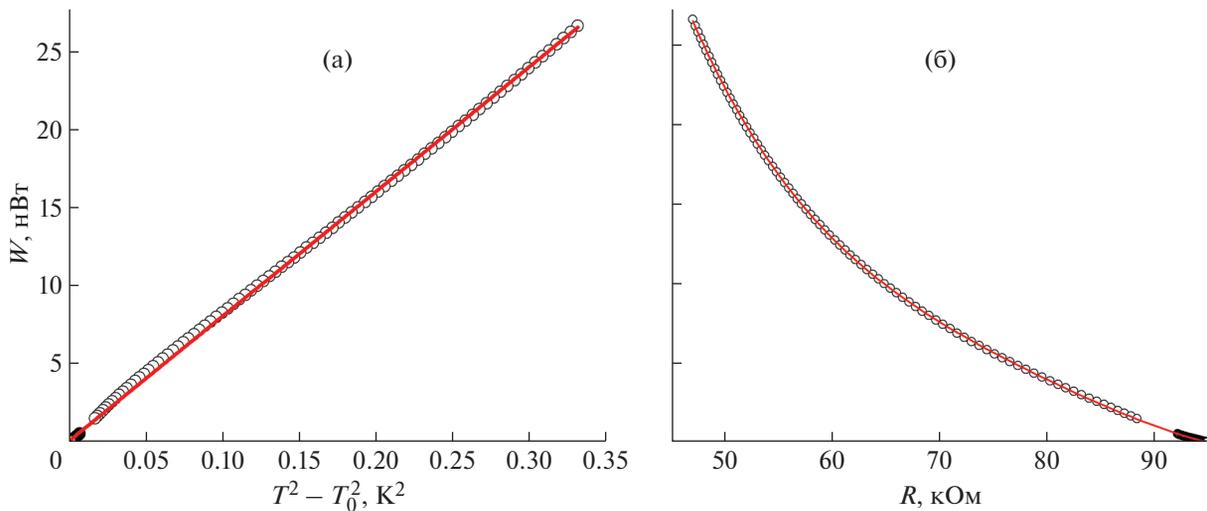


**Рис. 2.** Зависимость сопротивления  $R$  резистора от температуры  $T$ . Номинальное сопротивление при комнатной температуре – 10 кОм. Точки – эксперимент, линии – приближение законом Мотта  $R(T) = R_0 \exp(T_0/T)^x$ .

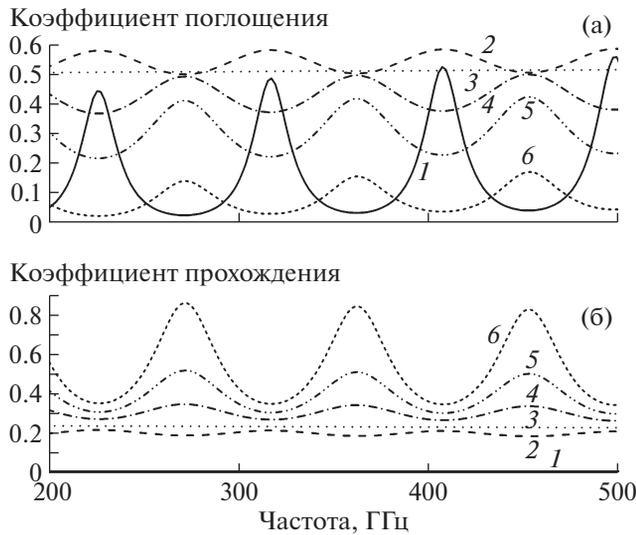
ких микроампер, приводящих к перегреву резистора, и устанавливалась зависимость  $W = UI$  от  $R = U/I$  (рис. 3а). Отметим, что в отличие от результатов, полученных при температуре  $T < 0.1$  К в работе [1], перегрев резистивного слоя относительно подложки при 0.3 К, обусловленный сопротивлением Капицы, на два порядка меньше, и он практически не влияет на результаты. При

включении л.о.в. при заданном уровне сигнала, регулируемом аттенуатором в тракте, измерялось соответствующее значение сопротивления. По калибровочной кривой рис. 3а определяется мощность излучения, поглощаемого болометром, а по рис. 2 – текущая температура  $T$  болометра. Отметим, что для болометра описанной конструкции чувствительность тем выше, чем лучше он теплоизолирован от подложки, но тем больше время установления стационарного состояния. Постоянная времени (параметр  $\tau$  экспоненциального изменения температуры  $\sim \exp(-t/\tau)$  при изменении падающей на приемник мощности) таких болометров в зависимости от толщины подложки (и, соответственно, теплоемкости резистора) составляет 0.1–2 с. Критерием того, что полученные данные соответствуют стационарному состоянию, является отсутствие гистерезиса при увеличении и уменьшении измерительного тока. Теплоотвод от болометра определяется подвесом из проволочек, причем теплопроводность сверхпроводника пренебрежимо мала, и поток тепла идет по нормальному металлу, занимающему половину сечения проволоки, и он определяется соотношением  $P = a(T_0^2 - T_{\text{exp}}^2)$ . Результаты, приведенные на рис. 3б, подтверждают корректность описанной процедуры.

Для того чтобы оценить полную мощность, падающую на приемник, необходимо знать его коэффициент поглощения  $A(f)$ . Зная параметры резистора и пленки нихрома, его можно рассчитать. Отметим, что при длинах волн, существенно меньших латеральных размеров, и при однородных в таких масштабах пленках дисперсия погло-



**Рис. 3.** Зависимости мощности нагрева измерительным током  $W$ : **а** – от разности квадратов температур резистора и держателя образцов  $T^2 - T_0^2$  (точки – эксперимент, линия – аппроксимация линейной зависимостью), **б** – от сопротивления резистора  $R$  (точки – эксперимент, линия – аппроксимация полиномом четвертой степени). Оба графика построены для одного и того же резистора при температуре подложки  $T_0 = 0.31$  К.



**Рис. 4.** Расчетные коэффициенты поглощения (а) и прохождения (б) в зависимости от частоты при комнатной температуре для резисторов номиналом 10 кОм и толщиной 0.55 мм для различных значений сопротивления поглощающей пленки (в Ом/□): 1 – 0, 2 – 150, 3 – 183.5, 4 – 300, 5 – 600, 6 – без пленки.

щения связана только с интерференцией в подложке резистора. При расчете использован метод трансфер матриц (transfer matrix method), применимый к тонким проводящим слоям [3] на подложках с известными оптическими свойствами материала в интересующем нас диапазоне частот от 100 ГГц до 1 ТГц. Для алюмооксидной керамики в работах [4, 5] приведены результаты измерений показателя преломления  $n$  и коэффициента поглощения материала  $k$ , мало отличающиеся от аналогичных свойств монокристаллического сапфира с показателем преломления  $n \approx 3$  и коэффициентом поглощения при комнатной температуре  $k \approx 5 \cdot 10^{-3}$ . Согласно работе [6], при охлаждении до гелиевых температур  $n$  меняется незначительно, а поглощение падает на порядок и практически не оказывает влияния на результаты. При расчете считалось, что толщина резистивного слоя, пленки никрома и защитных слоев много меньше и глубины скин-слоя, и длины волны, и толщины керамики, и учитывалась только интерференция в керамической подложке. Излучение падало на болометр из торца волновода, расположенного на расстоянии нескольких миллиметров от него. Поэтому влиянием металлизации на торцах резистора можно пренебречь. Результаты расчета поглощения и прохождения при нескольких значениях проводимости слоев представлены на рис. 4.

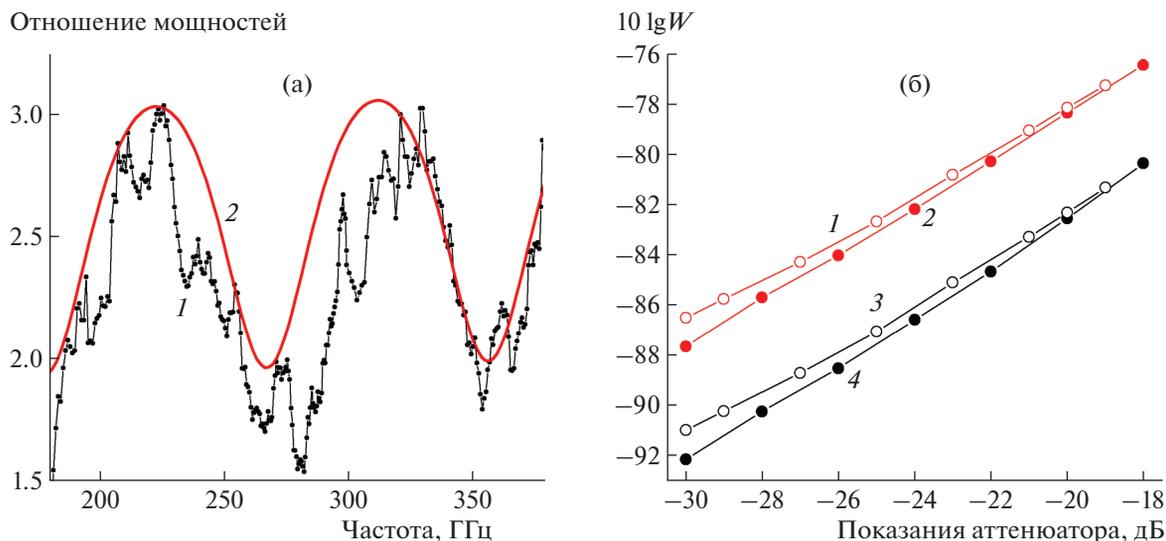
Отметим, что напыление пленки никрома приводит к увеличению коэффициента поглощения. При ее оптимальном сопротивлении  $\sim 185$  Ом/□ интерференция подавлена, а коэффициент поглощения  $A$  близок к 0.5 и слабо растет с частотой

из-за поглощения в подложке. Естественно, при охлаждении этот тренд практически исчезает. Важно отметить, что подобный результат достигается при правильной ориентации резистора – излучение должно падать на резистивный слой, поглощающая пленка при этом находится с его тыльной стороны.

Описываемый болометр предназначен для формирования сигнала сравнения при исследовании низкотемпературных приемников, на порядки более чувствительных. У них при тех потоках излучения, при которых отклик болометра заметно превышает шумы, как правило, наступает насыщение. Поэтому представляется целесообразным располагать их по ходу луча последовательно один над другим. При этом они могут быть расположены максимально близко, и болометр заодно будет в несколько раз ослаблять мощность излучения, попадающего на приемник. Поэтому мы провели испытание болометров в такой конфигурации: расположение двух болометров один над другим на расстоянии  $\sim 3$  мм. Сборка была изготовлена из резисторов  $6.4 \times 3.2 \times 0.55$  мм с поглощающей пленкой сопротивлением 300–400 Ом/□ на постоянном токе. Сопротивления резисторов при температуре 0.3 К составляли 169 кОм и 115.5 кОм. Уровень шума измеряемого на постоянном токе напряжения в этих экспериментах составляет несколько микровольт и в первую очередь определяется помехами при работе импульсной трубки, наводками и собственными шумами предусилителя. Такой уровень шумов задает точность измеряемого сопротивления резисторов на малых токах  $\pm 50$  Ом. Точность измерений может быть улучшена на один-два порядка при питании резисторов переменным током и синхронном детектировании сигнала.

На рис. 5б представлены результаты измерения поглощенной мощности  $W$  резисторами в зависимости от коэффициента ослабления аттенюатора для частоты падающего излучения 300 ГГц. Небольшое различие зависимостей при увеличении и уменьшении мощности сигнала, по-видимому, отражает люфт аттенюатора. Мощность, поглощаемая нижним резистором, в диапазоне 200–380 ГГц в среднем в 2.5 раза меньше мощности, поглощаемой верхним резистором. На рис. 5а приведена зависимость отношения поглощаемых резисторами мощностей от частоты.

На этой зависимости (графике кривой 1 на рис. 5а) хорошо заметны периодические изменения с частотой, связанные с интерференцией излучения внутри приемного резистора. Характер этих изменений согласуется с расчетом (кривая 2), полученным описанным выше способом. При расчете оба резистора считались одинаковыми, учитывалась только интерференция внутри каждого из резисторов, интерференцией при переот-



**Рис. 5.** а – зависимость отношения поглощенной мощности излучения верхним резистором к мощности, поглощенной нижним резистором, от частоты (1), 2 – расчетная зависимость; б – зависимости  $10 \lg W$  поглощенной мощности  $W$  верхним (1, 2) и нижним (3, 4) резисторами для различных значений коэффициента ослабления аттенюатора на частоте 300 ГГц: при его увеличении (1, 3) и уменьшении (2, 4).

ражениях между резисторами пренебрегалось. Отсутствие осцилляций с примерно вдвое меньшим периодом, которые могли бы отвечать интерференции в зазоре, оправдывает такое приближение. Хорошее согласие достигается, если считать сопротивление пленки равным  $\sim 600 \text{ Ом}/\square$ .

Контрольное измерение интерференционной картины при прохождении излучения через эти же болометры на фурье-спектрометре при комнатной температуре с точностью порядка 10% согласуется с этим значением сопротивления. Можно предположить, что импеданс пленок на высоких частотах превышает сопротивление на постоянном токе из-за возможных вариаций их толщины из-за мелкозернистой структуры керамической подложки. Полученные результаты показывают, что параметры низкотемпературных приемников субмиллиметрового диапазона могут быть заметно улучшены, если провести экспериментальный подбор толщины поглощающей пленки, обеспечивающий подавление интерференции в подложке.

Таким образом, описанная методика позволяет с точностью порядка 10–20%, определяемой точностью расчета поглощения излучения болометром, измерять абсолютную мощность субмиллиметрового излучения, падающего на исследуемые приемники. Чувствительность болометров

при 0.3 К порядка 10 пВт, постоянная времени 0.2–1 с.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность М.А. Тарасову за обсуждение, А.М. Чекушкину за помощь в напылении поглощающих пленок и М.А. Белянчикову за помощь в шлифовке резисторов и измерении их коэффициента прохождения при комнатной температуре.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лемзяков С.А., Эдельман В.С. // ПТЭ. 2016. № 4. С. 146. <https://doi.org/10.7868/S0032816216040248>
2. Grimaldi C., Ryser P., Strässler S. // J. Appl. Phys. 2000. V. 88. № 7. P. 4164. <https://doi.org/10.1063/1.1290738>
3. Zhan T., Shi X., Dai Y., Liu X., Zi J. // J. Phys.: Condensed Matter. 2013. V. 25. № 21. P. 215301. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/25/21/215301>
4. Worrell C.A. // J. Materials Sci.ence. 1986. V. 21. № 3. P. 781.
5. Nuzhnyy D., Petzelt J., Borodavka F., Vaněk P., Šimek D., Trunec M., Maca K. // Physica status solidi (B). 2017. V. 254. № 5. P. 1600607. <https://doi.org/10.1002/pssb.20160060>
6. Loewenstein E.V., Smith D.R., Morgan R.L. // Appl. Opt. 1973. V. 12. № 2. P. 398.