

УДК 621.396.67

АНТЕННЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СВЧ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ФОНОВЫХ ШУМОВ ПРИ УГЛОМЕСТНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ СОБСТВЕННОГО РАДИОТЕПЛОвого ИЗЛУЧЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

Федосеева Елена Валерьевна

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых».
E-mail: elenafedoseeva@yandex.ru.

Адрес: 602264, Россия, г. Муром, ул. Орловская, 23.

Аннотация: Рассмотрены условия формирования выходных сигналов СВЧ радиометрической системой с компенсацией фоновых шумов при угломестных измерениях собственного радиотеплового излучения атмосферы в величинах антенных температур. Представлены аналитические выражения для антенных температур основного и дополнительного приёмных каналов СВЧ радиометрической системы при выполнении угломестных измерений собственного радиотеплового излучения атмосферы на основе уравнения антенного сглаживания и результаты моделирования их нормированной разности.

Ключевые слова: угломестные измерения, собственное радиотепловое излучение атмосферы, антенная температура, многочастотная СВЧ радиометрическая система, компенсация фоновых шумов.

Введение

СВЧ радиометрические измерения собственного радиотеплового излучения атмосферы позволяют оперативно отслеживать её состояние и совместно с другими системами дистанционного зондирования представлять комплексные данные для формирования метеопрогнозов [1–5]. Расширение возможностей структурного и пространственного анализа состояния атмосферы в исследуемой области связано с переходом к многочастотным измерениям с реализацией углового сканирования, например, при угломестном зондировании СВЧ радиометрическими системами [3]. При выполнении угломестных СВЧ радиометрических измерений радиотеплового излучения атмосферы с существенным изменением угла места может значительно изменяться вклад фоновых шумов, обусловленных приёмом радиотеплового излучения окружающего антенну пространства через область рассеяния диаграммы направленности (ДН) антенны, что приводит к возникновению методической погрешности измерений, величина которой изменяется при изменении направления зондирования. Для уменьшения влияния данного помехового фактора разработан метод компенсации влияния фоновых шумов на основе двухканального разностного приёма с форми-

рованием на выходе дополнительного антенного канала сигнала, адекватного помеховой составляющей входного сигнала основного измерительного антенного канала при формировании на общей апертуре антенны двух ДН, соответствующих по распределению поля волнам H_{11} и E_{01} круглого волновода, который может быть реализован и в многочастотных СВЧ радиометрических системах [6–10].

В данной работе рассмотрены условия формирования выходного сигнала СВЧ радиометрической системы с двухканальным разностным приёмом на общую апертуру антенны при выполнении компенсации влияния фоновых шумов в двух частотных диапазонах при угломестных измерениях радиотеплового излучения атмосферы, выполнено моделирование антенной температуры с учетом явления "антенного сглаживания".

Антенная температура СВЧ радиометрической системы при угломестных измерениях

При проведении угломестных измерений СВЧ радиометрической системой определяется угловая зависимость интенсивности собственного радиотеплового излучения атмосферы, необходимая для решения задачи оценки высот-

ных профилей её физических параметров: температуры, влажности, водности и т.д.

Ограниченная пространственная селективность антенны СВЧ радиометрической системы приводит к снижению точности определения угловой зависимости интенсивности радиотеплового излучения атмосферы, что обусловлено явлением "антенного сглаживания". При этом антенная температура СВЧ радиометрической системы T_a при фиксированном направлении визирования антенны задается выражением [11–12]

$$T_a = \int_{4\pi} T_{\text{ярк}}(\Omega) F(\Omega) d\Omega / \int_{4\pi} F(\Omega) d\Omega, \quad (1)$$

где $T_{\text{ярк}}(\Omega)$ – угловое распределение радиояркой температуры окружающего антенну пространства в системе угловых координат, привязанной к направлению визирования антенны; $F(\Omega)$ – ДН антенны по мощности; Ω – пространственный угол.

Согласно (1) антенная температура СВЧ радиометрической системы является совокупной характеристикой радиотеплового излучения окружающего антенну пространства, вклад в которую излучения из соответствующего углового сектора зависит от коэффициента передачи антенны для данного сектора, определяемого нормированной ДН. При выполнении угломестных измерений необходимо учитывать изменение взаимного расположения антенны и углового распределения радиояркой температуры пространства, привязанного к определенному угловому направлению. При измерениях радиотеплового излучения атмосферы за такое направление принимается направление в зенит. В таком случае антенную температуру следует формировать как свёртку радиояркой температуры и ДН антенны, и выражение (1) преобразуется к виду

$$T_a(\Phi) = \frac{\int_{4\pi} T_{\text{ярк}}(\Omega) F(\Omega - \Phi) d\Omega}{\int_{4\pi} F(\Omega) d\Omega}, \quad (2)$$

где Φ – угловое направление в пространстве на область исследования, соответствующее

направлению максимального коэффициента передачи антенны – угол визирования, отсчитываемый от направления в зенит.

ДН антенны обладает осевой симметрией, поэтому для фиксированного азимутального угла в расчётах результатов угломестных измерений радиотеплового излучения атмосферы можно в выражении (2) перейти к интегрированию только по углу высоты θ .

В СВЧ радиометрической системе с компенсацией влияния фоновых шумов на выходе антенны формируются два выходных сигнала, пропорциональные антенным температурам каналов с приёмом на волнах H_{11} и E_{01} – соответственно T_{aH11} и T_{aE01} [13–14]. Далее в радиометре выполняется процедура нахождения разности для реализации компенсации составляющих, пропорциональных вкладу фоновых шумов. Выходной сигнал системы пропорционален разности антенных температур двух приёмных каналов СВЧ радиометрической системы

$$U_{\text{вых}} = k(T_{aH11} - T_{aE01}), \quad (3)$$

где k – коэффициент передачи радиометра системы.

Моделирование антенной температуры СВЧ радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов

При моделировании антенной температуры СВЧ радиометрической системы окружающее антенну пространство может быть разделено на два полупространства – атмосферу и подстилающую поверхность. Для выявления эффективности компенсации влияния фоновых шумов на результаты угломестных измерений радиотеплового излучения атмосферы СВЧ радиометрической системой подстилающая поверхность принималась однородной, характеризующейся средним значением радиояркой температуры T_m . Тогда антенная температура СВЧ радиометрической системы равна

$$T_a(\theta) = \left(\int_0^\pi F(\theta - \varphi) T_{\text{атм}}(\varphi) d\varphi + \right.$$

$$+T_{nm} \int_{\pi}^{2\pi} F(\theta - \varphi) d\varphi \Big) / \int_0^{2\pi} F(\varphi) d\varphi. \quad (4)$$

При моделировании антенных температур двух антенных каналов СВЧ радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов для учёта условия одновременного их формирования при приёме на общую апертуру на волнах H_{11} и E_{01} предусматривалась нормировка по максимальному уровню поля основного антенного канала с волной H_{11} .

Ненормированные ДН по мощности антенны с плоской круглой апертурой на двух волнах H_{11} и E_{01} в соответствии с [15] задавались выражениями

$$F_{H_{11}}(\theta) = \frac{\delta}{2\pi\gamma_{11}\mu_1^2(1-1/\mu_1^2)} \times \left[(1 + \cos\theta \cos\theta_{11}) \frac{J_1(\delta \sin\theta)}{\sin\theta} \right]^2 + \frac{\mu_1^2}{2\pi\gamma_{11}\delta(1-1/\mu_1^2)} \left[\frac{J'_1(\delta \sin\theta)}{\cos\theta - \cos\theta_{11}} \right]^2, \quad (5)$$

$$F_{E_{01}}(\theta) = \frac{\delta}{4\pi\gamma_{01}} \left[\frac{\sin\theta J_{01}(\delta \sin\theta)}{\cos\theta - \cos\theta_{01}} \right]^2, \quad (6)$$

где $\delta = 2\pi a / \lambda$ – безразмерный параметр, связанный с длиной волны λ и диаметром апертуры a ; $\mu_1 = 1841$ – критическое значение параметра δ для волны H_{11} ; $\gamma_{11} = \sqrt{\delta^2 - \mu_1^2}$ – безразмерное волновое число для волны H_{11} ; θ_{11} – угол, связанный с волновым числом соотношением: $k \cos\theta_{11} = -\omega_{11}$, где $\omega_{11} = \gamma_{11} / a$ – волновое число; $\nu_1 = 2,405$ – критическое значение параметра δ для волны E_{01} ; $\gamma_{01} = \sqrt{\delta^2 - \nu_1^2}$ – безразмерное волновое число для волны E_{01} ; θ_{01} – угол, связанный с волновым числом соотношением: $k \cos\theta_{01} = -\omega_{01}$, где $\omega_{01} = \gamma_{01} / a$ – волновое число; $J_0(x)$ – функция Бесселя нулевого порядка; $J_1(x)$ и $J'_1(x)$ – функция Бесселя 1-го порядка и её производная соответственно.

При моделировании антенной температуры СВЧ радиометрической системы при угломестных измерениях атмосферы с целью оценки эффективности компенсации влияния фоновых шумов при рассмотренном двухканальном приёме на общую апертуру антенны, угловая зависимость радиояркостной температуры для однородной атмосферы задавалась в виде [11]

$$T_{амм}(\varphi) = T_3 / \sin\varphi, \quad (7)$$

где угол φ отсчитывается от горизонта; T_3 – радиояркостная температура атмосферы в зените.

В процессе моделирования были рассчитаны угловые зависимости разности антенных температур двух антенных каналов СВЧ радиометрической системы – основного измерительного и дополнительного компенсационного. Результирующие разности антенных температур нормировались по разностной антенной температуре в направлении в зенит для обеспечения общих условий оценки эффективности компенсации влияния фоновых шумов на результаты угломестных измерений на разных частотах.

$$\Delta T_a(\Phi) = \frac{(T_{aH_{11}}(\Phi) - T_{aE_{01}}(\Phi))}{((T_{aH_{11}}(90^\circ) - T_{aE_{01}}(90^\circ)))}, \quad (8)$$

где $T_{aH_{11}}$ и $T_{aE_{01}}$ – антенные температуры основного измерительного канала и дополнительного канала формирования сигнала компенсации.

Результаты моделирования нормированных разностей антенных температур $\Delta T_a(\Phi)$ СВЧ радиометрической системы с компенсацией влияния фоновых шумов на частотах 4 ГГц и 9 ГГц при приёме на общую апертуру антенны с радиусом 120 см и 25 см в приземной угловой области от 5° до 15° приведены на рис. 1–2. Выбор размеров апертуры антенны и частот обусловлен параметрами и характеристиками многочастотной СВЧ радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов, разработанной и реализованной для решения задач дистанционного зондирования атмосферы [12–13].

В результате проведённого численного моделирования разности антенных температур СВЧ радиометрической системы при рассмотренных ранее условиях формирования выходных сигналов основного и дополнительного канала компенсации получили, что зависимость от угла места радиояростной температуры атмосферы, нормированной к радиояростной температуре атмосферы в зените, совпадает с графиком зависимости $\Delta T_a(\Phi)$ для антенны с радиусом апертуры 120 см на обеих частотах, поэтому отдельно данный график на рис. 1–2 не приведён, максимальное отличие составляло не более 0,1.

Анализ полученных результатов расчёта антенных температур СВЧ радиометрической системы с компенсацией влияния фоновых шумов показал, что максимальное отличие нормированной разности антенных температур от нормированной радиояростной температуры атмосферы имеет место при малых углах высоты, т.е. для приземных направлений зондирования. С ростом размеров апертуры антенны указанное отличие уменьшается и сужается угловая приземная область, в которой имеют место данные отличия. На рис. 3 приведена зависимость относительной разности антенных температур $\delta T_a(\Phi)$ в процентах от радиояростной температуры однородной атмосферы при соответствующем угле места, вычисленная по формуле

$$\delta T_a(\Phi) = \frac{\Delta T_a(\Phi) - T_{атм}(\Phi)}{T_{атм}(\Phi)} \cdot 100\% \quad (9)$$

Согласно рис. 3 на частоте 4 ГГц для апертуры радиуса 25 мм существенные отличия разности антенных температур от теоретической нормированной угломестной зависимости радиояростной температуры однородной атмосферы (около 15%), наблюдаются для углов места менее 8°, а на частоте 9 ГГц эта область смещается к 5°.

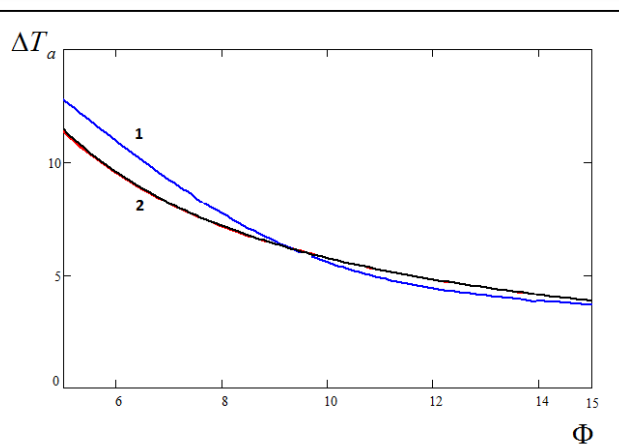


Рис. 1. Угловая зависимость нормированной разности антенных температур СВЧ радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов для антенн с радиусом апертуры 25 см (1) и 120 см (2) на частоте 4 ГГц

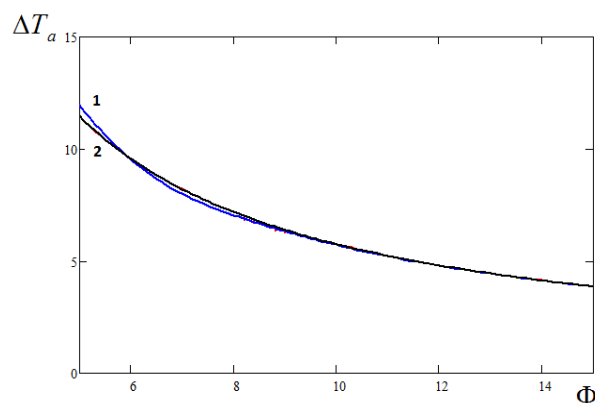


Рис. 2. Угловая зависимость нормированной разности антенных температур СВЧ радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов для антенн с радиусом апертуры 25 см (1) и 120 см (2) на частоте 9 ГГц

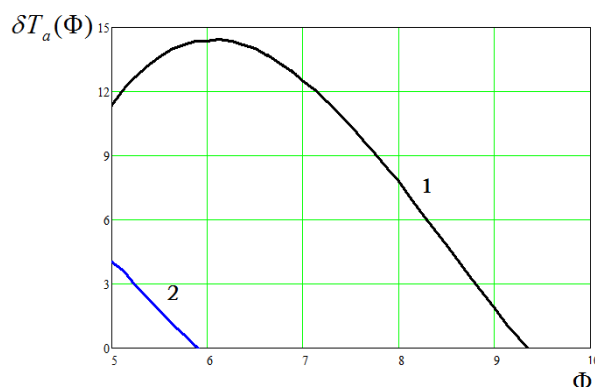


Рис. 3. Угловая зависимость относительной разности антенных температур СВЧ радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов для антенны с радиусом апертуры 25 см на частотах 4 ГГц (1) и 9 ГГц (2)

Заключение

Полученные результаты численного моделирования антенных температур СВЧ радиометрической системы с двухканальным приёмом на двух модах на общую апертуру антенны с получением дополнительного сигнала компенсации и формированием разностного выходного сигнала показали эффективность такой компенсации влияния фоновых шумов на результаты угломестных измерений собственного радиозумового излучения атмосферы.

Хорошее совпадение нормированной разности антенных температур двухканальной СВЧ радиометрической системы и нормированной теоретической зависимости радиояркой температуры атмосферы в широком диапазоне углов места от 5° до 90° позволяет рекомендовать использовать данную систему для угломестных измерений сильно неоднородной атмосферы и в условиях больших вариаций фоновых шумов.

Литература

1. Степаненко В.Д., Щукин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю. Радиотеплолокация в метеорологии. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 283 с.
2. Караваев Д.М., Щукин Г.Г. Применение методов СВЧ-радиометрии для диагноза содержания жидкокапельной влаги в облаках // Труды НИЦ ДЗА. Сер. Прикладная Метеорология. 2004. Вып. 5 (533). С. 99–120.
3. Ware R.A. A multichannel radiometric profiler of temperature, humidity, and cloud liquid // Radio Science. 2003. Vol. 38, No. 4. 8079. Pp. 1–13.
4. Rose T. A network suitable microwave radiometer for operational monitoring of cloudy atmosphere. Atmospheric Research. 2005. Pp. 183–200.
5. Pranab Kumar Karmakar. Ground-Based Microwave Radiometry and Remote Sensing. Methods and Applications. CRC Press, 2013. 214 p.
6. Федосеева Е.В. Анализ погрешности измерения радиояркого контраста методом диаграммной модуляции в системах пассивной тепловой радиолокации // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. №1 (9). С. 4–9.
7. Федосеева Е.В., Щукин Г.Г., Ростокин И.Н., Ростокина Е.А. Компенсация помех в работе СВЧ радиометрических систем // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2014. № 1(13). С. 50–62.
8. Федосеева Е.В. Радиометрическая система с компенсацией аддитивных внешних фоновых помех: пат. РФ № 91630; опубл. 20.02.2010. Бюл. № 5.
9. Ростокин И.Н., Федосеева Е.В. Вопросы построения многочастотной СВЧ радиометрической системы дистанционного зондирования облачной атмосферы с компенсацией фонового излучения // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2015. № 1(17). С. 5–12.
10. Fedoseeva E.V. An Estimate of the Error of Measurements of Radio Brightness Temperature in Radio-Heat Location Systems for Monitoring Meteorological Parameters with Background Noise Compensation // Measurement Techniques. March, 2015, Vol. 57, Iss. 12. Pp. 1463–1468.
11. Цейтлин Н.М. Антенная техника и радиоастрономия. М.: Советское радио, 1976. 352 с.
12. Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н. Радиотелескопы и радиометры. М.: Наука, 1973. 416 с.
13. Fedoseeva, E.V., Rostokin I.N., Fedoseev A.A. Research mode dual-band antenna splitter dual-channel microwave radiometric system with compensation of background noise // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. Omsk : Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21–23, 2015.
14. Ростокин И.Н., Федосеева Е.В. Исследование антенного устройства трёхдиапазонной СВЧ – радиометрической системы дистанционного зондирования атмосферы с компенсацией влияния фонового излучения // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2015. № 3(19). С. 94–100.
15. Вайнштейн Л.А. Дифракция электромагнитных и звуковых волн на открытом конце волновода. М.: Сов. Радио, 1953. 204 с.

Поступила 3 декабря 2018 г.

English

ANTENNA TEMPERATURES OF MICROWAVE RADIOMETRIC SYSTEM WITH BACKGROUND NOISE COMPENSATION IN THE ELEVATION MEASUREMENT OF ITS ATMOSPHERIC RADIO THERMAL RADIATION

Elena Valeryevna Fedoseeva – Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor of Radio Engineering Department of Murom Institute (Branch) “Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nickolay Grigoryevich Stoletov”.

E-mail: elenafedoseeva@yandex.ru.

Address: 602264, Murom, Orlovskaya str., 23.

Abstract: The article examines the antenna temperature simulation problems of the microwave radiometric system with background noise compensation in the elevation measurement of its atmospheric radio thermal radiation. There are analyzed conditions for generating output signal in the microwave radiometric system in antenna temperatures values with two-channel reception and compensation signal generation in the auxiliary channel output defining these signals' difference. The expression for the antenna temperature is adopted in the form of radio-brightness temperature convolution and antenna pattern for considering the effect of antenna limited spatial selectivity on the results of the microwave radiometric system elevation measurements in order to take into account the "antenna smoothing phenomenon". The article presents the numerical calculation results of antenna temperatures' difference for two antenna channels of the microwave radiometric system with background noise compensation normalized to the same difference for the Zenith measurements in homogeneous atmosphere for two apertures of 25 cm and 120 cm on two frequencies of 4 GHz and 9 GHz and the error estimation of these measurements is made. The obtained results of antenna temperature simulation enabled to make a conclusion about the efficiency of microwave radiometric system with background noise compensation with the elevation measurements of the antenna's own brightness radiation for solving the problems of the atmosphere operational control and configuring its weather parameter height profiles, especially in the environment of background noise big variations.

Keywords: angular measurements, the atmosphere's own radio-thermal radiation, antenna temperature, multi-frequency microwave radiometric system, background noise compensation.

References

1. *Stepanenko V.D., Schukin G.G., Bobyliv L.P., Matrosov S.Yu.* Radio-heat location in meteorology. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987. 283 p.
2. *Karavayev D.M., Schukin G.G.* Application of microwave radiometry methods for content analysis of cloud droplet moisture. Coll. of Papers RC DZA. Ed. Applied Meteorology. 2004. Iss. 5 (533). Pp. 99–120.
3. *Ware R.A.* a multichannel radiometric profiler of temperature, humidity, and cloud liquid. Radio Science. 2003. Vol. 38, No. 38. 4. 8079. Pp. 1–13.
4. *Rose T.* A network suitable microwave radiometer for operational monitoring of cloudy atmosphere. Atmospheric Reseach. 2005. Pp. 183–200.
5. *Pranab Kumar Karmakar.* Ground-Based Microwave Radiometry and Remote Sensing. Methods and Applications. CRC Press, 2013. 214 p.
6. *Fedoseeva E.V.* Analysis of errors of measurement of the radio brightness contrast method of the diagram of modulation systems of passive thermal radar-location. Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy. 2013. No. 1 (9). Pp. 4–9.
7. *Fedoseeva E.V., Schukin G.G., Rostokin I.N., Rostokina E.A.* Noise compensation in microwave radiometric system operation. Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy. 2014. № 1 (13). P. 50-62.
8. *Fedoseeva E. V.* Radiometric system with compensation of additive external background noises: Pat. RF No. 91630; publ. 20.02.2010. Bul. No. 5.
9. *Rostokin I.N., Fedoseeva E.V.* Problems of developping multifrequency microwave radiometric system of remote probing cloudy atmosphere with background emission compensation. Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy. 2015. No. 1 (17). Pp. 5–12.
10. *Fedoseeva E.V.* An Estimate of the Error of Measurements of Radio Brightness Temperature in Radio-Heat Location Systems for Monitoring Meteorological Parameters with Background Noise Compensation. Measurement Techniques. March, 2015, Vol. 57, Iss. 12. Pp. 1463–1468.
11. *Tseitlin N.M.* Aerial equipment and radio astronomy. Moscow: Soviet radio, 1976. 352 p.
12. *Esepkina N.A. Korolkov D.V., Parijskij Yu.N.* Radio telescopes and radiometers. Moscow: Nauka, 1973. 416 p.
13. *Fedoseeva, E.V., Rostokin I.N., Fedoseev A.A.* Research mode dual-band antenna splitter dual-channel microwave radiometric system with compensation of background noise. 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21-23, 2015.
14. *Rostokin I.N. Fedoseeva E.V.* Antenna assembly research of three-band microwave – radiometric system for atmospheric remote sensing with background radiation compensation. Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy. 2015. № 3 (19). Pp. 94–100.
15. *Weinstein L.A.* Electromagnetic and sound wave diffraction in open-ended waveguide. Moscow: Sov. Radio, 1953. 204 p.