

ОСОБЕННОСТИ СКАНИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ И ПОСТРОЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С МАЛОЭЛЕМЕНТНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКОЙ

В. М. Владимиров¹, В. Н. Ратушняк² ✉,

В. А. Вяхирев², И. В. Тяпкин²

¹ ООО «НПФ Электрон», г. Красноярск, Российская Федерация

² Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация

Подвижность и изменчивость атмосферы и околоземного космического пространства делают крайне важным получение экспериментальной информации о ее динамических характеристиках: скорости, направлении ветра и степени турбулентности. Одним из перспективных методов получения этих данных является вертикальное радиолокационное зондирование атмосферы. Радиолокационные станции вертикального зондирования или ветровые профилометры – относительно новый вид аппаратуры для исследования атмосферы. Радиолокационные станции вертикального зондирования предназначены для дистанционного бесконтактного определения параметров скорости ветра над точкой зондирования в тропосфере и нижней части термосферы. Для получения информации о динамике атмосферных движений используется явление отражения электромагнитных волн от турбулентных образований и образований другой природы. Временное положение отраженного сигнала и сдвиг по частоте, обусловленный эффектом Доплера, дают точную информацию о высоте и скорости перемещения атмосферных неоднородностей. Анализ параметров отраженных сигналов позволяет получать в реальном масштабе времени высотно-временное поле скорости ветра и интенсивности турбулентности. Физические принципы, положенные в основу функционирования этих станций, позволяют проводить непрерывные измерения независимо от погодных условий. В статье рассматриваются основные методы измерения вертикального профиля атмосферы и нижней части термосферы, способы сканирования и классификация средств зондирования вертикального профиля атмосферы, а также особенности функционирования и построения радиолокационных станций вертикального зондирования с малоэлементной решеткой.

Ключевые слова: радиолокационная станция вертикального зондирования, МСТ-радар, ветровой профилометр, малоразмерная антенная решетка, атмосферные неоднородности.

Введение

Радиолокационные станции вертикального зондирования (РЛС ВЗ) позволяют исследовать

различные неоднородности атмосферы (рис. 1): средний ветер (зональную, меридиональную и вертикальную составляющие); крупномасштабные атмосферные процессы (циклоны, прохождение атмосферных фронтов, гроз и т. д.); мелкомасштабные процессы (конвекция, вихревые движения, термики и т. д.); струйные течения; атмосферные приливы; турбулентность в свободной атмосфере. Исходя из этого, прикладными вопросами использования РЛС ВЗ являются: метеорологическое обеспечение взлета, посадки воздушных судов, обнаружение зон повышенной турбулентности, опасных для авиации, а также экологический мониторинг в местах расположения опасных производств и предупреждение о

✉ oborona-81@yandex.ru

© Владимиров В. М., Ратушняк В. Н.,
Вяхирев В. А., Тяпкин И. В., 2019

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта: «Методы радиолокационного зондирования атмосферы с использованием малоэлементных антенных решеток».

возникновении аномальных атмосферных явлений [1–4].

Проблемой определения вертикального профиля атмосферы занимаются ученые многих стран мира. В настоящее время известно несколько методов зондирования атмосферы.

Традиционным способом зондирования атмосферы является аэрологическое зондирование, которое осуществляется с помощью зондов, наполненных водородом или гелием, поднимаемых на высоту 30–40 км. Зонды оснащены радиопередатчиком, который излучает зондирующий сигнал. Величину и направление ветра на различных высотах определяют на основе доплеровского сдвига частоты зондирующего сигнала и положения зонда в пространстве. Недостатками этого метода является высокая стоимость зондов и большое время между запусками. Однако, несмотря на это, данный метод до сих пор является основным методом определения параметров атмосферы.

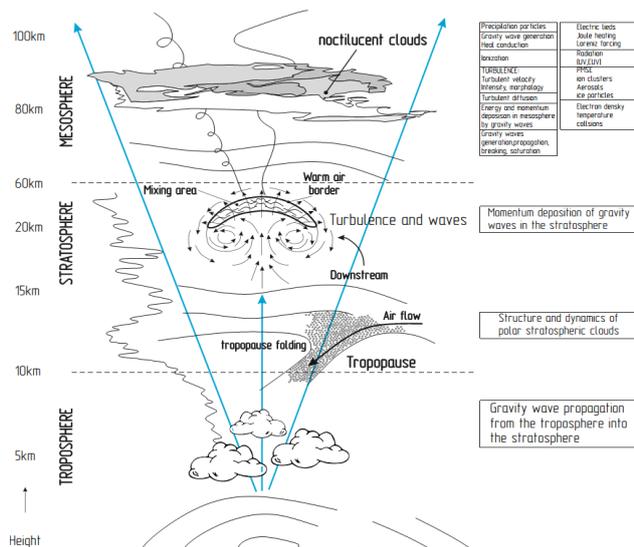


Рис. 1. Возможные неоднородности атмосферы

Существует четыре основных метода дистанционного зондирования атмосферы: оптический, акустический, радиоакустический и радиолокационный. Во всех способах дистанционного зондирования излучается соответствующий зондирующий сигнал, который отражается от различных слоев атмосферы в обратном направлении, и затем отраженный сигнал фиксируется приемным устройством.

Самым современным способом получения информации о состоянии атмосферных процессов является вертикальное радиолокационное зондирование атмосферы. Радиолокационные системы вертикального зондирования атмосферы работают в импульсном режиме и используют обратное рассеяние на неоднородностях коэффициента прелом-

ления в атмосфере. Как правило, это достаточно большие высокоэнергетические системы, работающие на фиксированной частоте в основном в трех интервалах частот – 50, 400 и 1000 МГц. В настоящее время существует несколько сетей РЛС ВЗ, получивших признание как важная составляющая часть метеорологических наблюдений. Эти радары можно систематизировать следующим образом:

- мезосферно-стратосферно-тропосферные (МСТ) радары, работающие на частоте 56,5...58 МГц и обеспечивающие измерения до высоты 60...90 км;
- стратосферно-тропосферные (СТ) радары, работающие на частотах 45...56 и 400...490 МГц и обеспечивающие измерения до высоты 20 км;
- тропосферные радары пограничного слоя, работающие на частоте 45...47,1 МГц и обеспечивающие измерения до высоты 8 км.

Для научных метеорологических исследований в основном применяются мощные МСТ-радары, имеющие огромные (несколько сотен излучателей) антенные поля, и, соответственно, высокое энергопотребление и достаточно высокую стоимость.

Одним из перспективных направлений признается разработка и использование мобильных ветровых профилометров на основе малоэлементных антенных решеток. Данные устройства позволяют проводить метеорологические исследования, в том числе наблюдать и быстропротекающие атмосферные процессы.

1. Способы сканирования радиолокационными станциями вертикального зондирования

Два основных механизма приводят к возврату радиоволн от неоднородностей в атмосфере. Это рассеяние на турбулентностях и френелевское отражение или рассеяние. Турбулентное, или брэгговское, рассеяние происходит благодаря неоднородностям в индексе преломления в турбулентностях, для которого основной масштаб Фурье соответствует половине проекции длины волны на радиоволновой вектор. Френелевское отражение (также известное как частичное отражение) происходит благодаря присутствию неравномерностей индекса преломления, поперечного направлению распространению радиоволны, что мало по сравнению с длиной волны зондирующего сигнала. Для вертикального случая френелевское отражение требует горизонтальной протяженности нерегулярности более чем величины одной зоны Френеля, которая составляет $\lambda z/2$, где λ – длина волны, а z – высота рассеяния. Вертикальный размер неоднородности в таком случае может быть менее $\lambda/4$. На практике минимальные горизонтальные размеры нерегулярности должны быть

только больше ширины радарного луча, а ступенька вертикального распространения в индексе преломления менее чем $\lambda/4$ часто содержит масштаб Фурье, вполне достаточный для возврата сигнала. Френелевское рассеяние происходит, когда рассеивающая среда согласована (когерентна) в двух поперечных измерениях к зондирующей волне, и произвольна в направлении, параллельном радиоволновому вектору.

РЛС ВЗ используют градиенты в индексе преломления как цель для определения движения фонового ветра и интенсивности турбулентностей, применяя различные методики. Индекс преломления n на частотах более 30 МГц описывается следующим образом [5–8]:

$$n = 1 - 0,373 \frac{e}{T^2} + 77,6 \cdot 10^6 \frac{p}{T} - 40,3 \frac{N_e}{f^2}, \quad (1)$$

где e – влажность, T – температура, p – давление, N_e – плотность электронов, f – частота. Флуктуации e , T и N_e в масштабах порядка половины длины волны дают брэгговское рассеяние. Разрывы в индексе преломления порядка $\frac{1}{10\lambda}$ также дают обратный сигнал.

Вторые два члена в уравнении (1) относятся к флуктуациям в нейтральной атмосфере. Влажность дает наибольший вклад до высот порядка 5 км. Последний член уравнения, связанный с плотностью электронов в ионосфере, дает вклад на высотах более 50 км.

Природа неоднородностей лимитирована следующими двумя случаями. Это рассеяние на изотропной турбулентности и рассеяние на одиночной резко ограниченной разрывности среды. Мощность, возвращающаяся в случае изотропной турбулентности, может выражаться [9]:

$$P_R = \frac{\pi P A \alpha \Delta R}{64 R^2} \eta, \quad (2)$$

где P – передающаяся мощность, A – эффективная площадь антенны, α – общий коэффициент полезного действия системы, ΔR – длина радарного импульса, R – дальность, и η – коэффициент объемного отражения как мера протяженности турбулентности.

Рассеяние также наблюдается на резких ступеньках градиента индекса преломления. В этом случае рассеяние обусловлено френелевским рассеянием или отражением. Возвращаемая мощность описывается следующим образом:

$$P_R = \frac{P A^2 \alpha}{4 \lambda^2 R^2} |\rho|^2, \quad (3)$$

где λ – радарная длина волны, ρ – коэффициент отражения.

Отраженный сигнал содержит смесь из брэгговского и френелевского типов рассеяния,

и показывает существенную чувствительность к максимумом возвращения из зенита.

Измерение скорости и направления неоднородностей атмосферы основано на использовании эффекта Доплера, где зависимость между зональной (u), меридиональной (v) и вертикальной (w) компонентами скорости и радиальной скоростью определяется выражением:

$$v_r = u \sin \phi \sin \theta + v \cos \phi \sin \theta + w \cos \theta, \quad (4)$$

где ϕ – азимут, θ – зенитный угол.

Методика доплеровского сканирования.

Данная методика использует множество узких пучков для измерения радиальной скорости во множестве направлений. Для построения трехмерного поля ветра требуется, как минимум, три луча. Фактически, большинство доплеровских радаров в настоящее время используют пятилучевое исполнение. Это позволяет использовать избыточность при измерениях горизонтального ветра и дает возможность определения дополнительных параметров, включая плотность и др.

Методика разнесенных антенн.

Это другая методика, не требующая формирования узких околоразнесенных пучков и сканирования диаграммой направленности. Она более подходит для небольших устройств, работающих в пограничном слое и нижней тропосфере. Тем не менее она дает аналогичный набор данных, как и доплеровское сканирование. Методика разнесенных антенн использует вариацию доплеровского смещения при углах, на которых результирующее движение электрического поля над поверхностью Земли имеет случайную структуру и перемещается со скоростью, вдвое большей горизонтального ветра на высоте обратного рассеивания. Требуется, как минимум, 3 разнесенных антенны для получения измерений посредством корреляционного анализа для значений скорости неоднородностей. Преимущество этой методики состоит в использовании малоэлементной антенной решетки с вертикальным широким лучом. Для данной методики характерна чувствительность к атмосферным изменениям в вертикальном направлении.

Необходимо отметить, что большинство действующих МСТ-радаров использует обе методики. Для небольших высот чаще используется методика измерений с разделенными антеннами, для больших – методика доплеровских измерений со сканированием луча. Это не исключает возможности применения любой из методик в конкретном случае при любых рабочих высотах.

Разработка РЛС ВЗ с малоэлементной решеткой требует решения серьезных проблем,

связанных, прежде всего, с уменьшением энергетического потенциала из-за общего снижения отношения сигнал/шум на входе приемника за счет уменьшения апертуры антенны и уменьшения числа передающих модулей. Указанное обстоятельство не позволяет применять стандартные алгоритмы подавления отражений от местных предметов и выделения на их фоне полезных сигналов [10]. В подобных условиях наиболее перспективными методами будут являться адаптивная компенсация мешающих сигналов с использованием череспериодных автокомпенсаторов или, с учетом достаточно низкой динамики принимаемых сигналов, составление «карты местных предметов».

Перспективным подходом в обработке сигналов с низким отношением сигнал/шум в приложении к РЛС ВЗ является применение специальных зондирующих сигналов. Это и сложные шумоподобные сигналы (коды Баркера, М-последовательности), и «смычки» сигналов с различными законами модуляции для компенсации боковых лепестков автокорреляционной функции при их последующей обработке.

Одним из наиболее перспективных подходов к вопросу улучшения разрешающей способности РЛС ВЗ при уменьшении размеров антенной решетки является использование многочастотных сигналов. В этом случае сигнал с меньшей частотой служит для устранения побочных интерференционных максимумов диаграммы направленности и разрешения фазовой неоднозначности сигнала на более высокой частоте. Основными проблемами, возникающими при реализации подобного подхода, являются обеспечение когерентности сигналов и идентичности высокочастотного тракта на различных частотах. Когерентность сигналов можно обеспечить формированием многочастотных сигналов при использовании стандарта частоты и времени в качестве опорного генератора. Идентичность высокочастотного тракта на разных частотах обеспечивается применением специально разработанных СВЧ-элементов с улучшенными характеристиками: фазочастотной, группового времени запаздывания, а также высокоточной калибровкой тракта. Таким образом, применение этих подходов позволит реализовать гибкое управление диаграммой направленности и работать как в режиме пространственно-разнесенных антенн, так и в режиме доплеровского качающегося луча.

Таким образом, современная РЛС ВЗ с малоэлементной решеткой должна иметь следующие особенности построения:

- использование трех или четырехэлементных антенн Яги с целью повышения коэффициента использования площади (и, как следствие, сужение диаграммы направленности) антенной

решетки (рис. 2);

- применение антенн с круговой поляризацией;
- использование твердотельных усилителей и, как следствие, распределение суммарной мощности по всему полю фазированной антенной решетки;
- наличие системы дистанционного управления лучом антенны;
- применение в приемниках цифровых методов когерентного и некогерентного накопления сигналов для повышения энергетических характеристик при приеме;
- накопление «сырых» отсчетов в долговременной памяти для обеспечения возможности последующего анализа на основе новых научных данных.

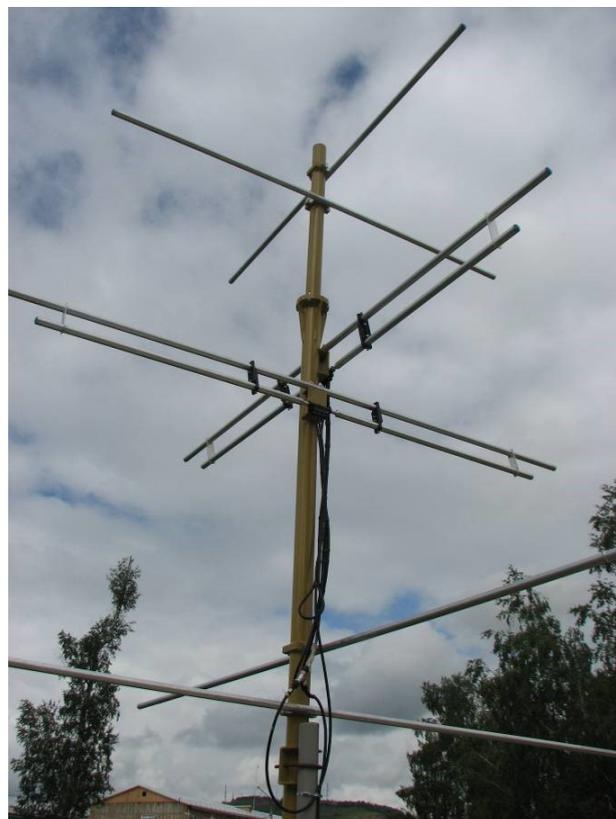


Рис. 2. Внешний вид антенного элемента МСТ-радара

Заключение

Таким образом, развитие и внедрение РЛС ВЗ на основе малоэлементной антенной решетки, обладающими высокими характеристиками разрешающей способности по высоте, низкими массогабаритными показателями и энергопотреблением, позволит исследовать различные неоднородности атмосферы, производить мониторинг аномальных атмосферных явлений и решать задачи метеорологического обеспечения.

Список литературы

- [1] Сетов А. Г., Медведев А. В., Кушнарев Д. С., Васильев Р. В., Лебедев В. П. Исследование возможностей антенной системы нового радара НР-МСТ при различных режимах работы // Сборник «Взаимодействие полей и излучения с веществом». Труды Международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике и Конференции молодых ученых, 2015, С. 188–190.
- [2] Селиванов Д. Ю. Модели и методы обработки сигналов ветровым профилометром с разнесенными антеннами : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, Уральский государственный технический университет, 2007.
- [3] Ахметьянов В. Р., Васильев Д. Н., Коняев М. А., Мишина О. А., Пенкин М. С., Петров Г. А., Тезадов Я. А., Шаталов И. В., Ширяев И. Ф. Методы и алгоритмы обработки данных ветрового когерентного доплеровского лидарного профилометра с коническим сканированием // Журнал радиоэлектроники. 2013. № 10. С. 11.
- [4] Потехин А. П., Сетов А. Г., Лебедев В. П., Медведев А. В., Кушнарев Д. С. Перспективный радар НР-МСТ: потенциал и диагностические возможности // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2. № 3. С. 3–16.
- [5] Бурлаков В. Д., Долгий С. И., Макеев А. П., Матвиенко Г. Г., Невзоров А. В., Солдатов А. Н., Романовский О. А., Харченко О. В., Яковлев С. В. Лидарные технологии дистанционного зондирования параметров атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 10. С. 829–837.
- [6] Шаманский Ю. В. Вариации атмосферно-электрических характеристик в тропосфере и стратосфере // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18. № 1–2. С. 185–187.
- [7] Nishimura K., Nakamura T., Sato T., Sato K. Adaptive Beamforming Technique for Accurate Vertical Wind Measurements with Multichannel MST Radar // American Meteorological Society. 2012. pp. 1769–1775.
- [8] Park S.-G., Lee D.-K. Retrieval of high-resolution wind field over the Southern Korean peninsula using the Doppler weather radar network // Weather and Forecasting. 2009. pp. 87–103.
- [9] Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли / под общ. ред. Б. Л. Кашеева, Е. Г. Прошкина, М. Ф. Лагутина. Харьков : Харьк. нац. ун-т радиоэлектроники; Бизнес Информ, 2002. 426 с.
- [10] Владимиров В. М., Кашкин В. Б., Сенченко Я. И. Модернизация приемника радиолокационной станции вертикального зондирования атмосферы // Сборник «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли». Материалы III Международной научной конференции, 2016, С. 74–77.

FEATURES OF SCANNING THE ATMOSPHERE AND BUILDING RADAR STATIONS OF VERTICAL SOUNDING WITH A LOW-ELEMENT ANTENNA ARRAY

V. M. Vladimirov¹, V. N. Ratushnyak²,

V. A. Vyakhirev², I. V. Tyapkin²

¹ LLC NPF Electron, Krasnoyarsk, Russian Federation

² Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

The mobility and variability of the atmosphere and near-Earth space make it extremely important to obtain experimental information about its dynamic characteristics – speed, wind direction and degree of turbulence. One of the promising methods for obtaining these data is vertical radar sounding of the atmosphere. Vertical sounding radars or wind profilometers are a relatively new type of equipment for studying the atmosphere and thermosphere. Vertical sounding radars are designed for remote non-contact determination of wind speed parameters above the sounding point in the troposphere and the lower part of the thermosphere. To obtain information on the dynamics of atmospheric movements the phenomenon of reflection of electromagnetic waves from turbulent formations and formations of a different nature is used. The temporal position of the reflected signal and the frequency shift due to the Doppler effect give accurate information about the height and speed of movement of atmospheric inhomogeneities. An analysis of the parameters of the reflected signals makes it possible to obtain in real time the altitude-time field of the wind speed and turbulence intensity. The physical principles underlying the operation of these stations allow continuous measurements, regardless of weather conditions. The article discusses the main methods for measuring the vertical profile of the atmo-

sphere and the lower part of the thermosphere, scanning methods and classification of sounding means for the vertical profile of the atmosphere, as well as the features of the functioning and construction of vertical sounding radars with a low-element array.

Keywords: vertical sensing radar, MST radar, wind profilometer, small antenna array, atmospheric inhomogeneities.

References

- [1] Setov A. G., Medvedev A. V., Kushnarev D. S., Vasiliev R. V., Lebedev V. P. *Issledovanie vozmozhnostej antennoj sistemy novogo radara NR-MST pri razlichnyh rezhimah raboty* [Investigation of the capabilities of the antenna system of the new NR-MST radar under various operating modes] // Collection «Interaction of fields and radiation with matter». Works of the International Baikal Youth Scientific School on Fundamental Physics and the Conference of Young Scientists, 2015, pp. 188–190. (In Russian)
- [2] Selivanov D. Yu. *Modeli i metody obrabotki signalov vetrovym profilometrom s raznesennymi antennami* [Models and methods for processing signals with a wind profiler with diversity antennas] // Abstract of PhD thesis, Ekaterinburg, Ural State Technical University, 2007. (In Russian)
- [3] Akhmetyanov V. R., Vasiliev D. N., Konyaev M. A., Mishina O. A., Penkin M. S., Petrov G. A., Tezadov Y. A., Shatalov I. V., Shiryaev I. F. *Metody i algoritmy obrabotki dannyh vetrovogo kogerentnogo doplerovskogo lidarnogo profilometra s konicheskim skanirivaniem* [Methods and algorithms for data processing of a coherent wind Doppler lidar profilometer with conical scanning] // Journal of Radio Electronics, 2013, no. 10, p. 11.
- [4] Potekhin A. P., Setov A. G., Lebedev V. P., Medvedev A. V., Kushnarev D. S. Prospective IS-MST radar. Potential and diagnostic capabilities // Solar-Terrestrial Physics, 2016, vol. 2, no. 3, pp. 3–21.
- [5] Burlakov V. D., Dolgii S. I., Makeev A. P., Matvienko G. G., Nevzorov A. V., Soldatov A. N., Romanovskii O. A., Kharchenko O. V., Yakovlev S. V. Lidar technology for remote sensing of atmospheric parameters // Atmospheric and Oceanic Optics, 2013, vol. 26, no. 10, pp. 829–837.
- [6] Shamansky Yu. V. Variations of atmospheric-electrical characteristics in the troposphere and stratosphere // Atmospheric and Oceanic Optics, 2005, vol. 18, no. 1–2, pp. 185–187.
- [7] Nishimura K., Nakamura T., Sato T., Sato K. Adaptive Beamforming Technique for Accurate Vertical Wind Measurements with Multichannel MST Radar // American Meteorological Society, 2012, pp. 1769–1775.
- [8] Park S.-G., Lee D.-K. Retrieval of high-resolution wind field over the Southern Korean peninsula using the Doppler weather radar network // Weather and Forecasting, 2009, pp. 87–103.
- [9] Kashcheeva B. L., Proshkina E. G., Lagutina M. F. *Distancionnye metody i sredstva issledovaniya processov v atmosfere Zemli* [Remote methods and tools for researching processes in the Earth's atmosphere]. Kharkov, Kharkiv National University of Radio Electronics; Business Inform, 2002, 442 p. (In Russian)
- [10] Vladimirov V. M., Kashkin V. B., Senchenko Ya. I. *Modernizaciya priemnika radiolokacionnoj stancii vertikal'nogo zondirovaniya atmosfery* [Modernization of the receiver of a radar station for vertical atmospheric sounding] // Collection «Regional Problems of Remote Sensing of the Earth». Materials of the III International Scientific Conference, 2016, pp. 74–77. (In Russian)