

DOI: 10.18721/JE.11502

УДК 330

## ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИОЧАСТОТНОГО СПЕКТРА В УСЛОВИЯХ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ\*

**В.В. Ноздрин<sup>1</sup>, В.В. Макаров<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Международный союз электросвязи, г. Женева, Швейцария

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Переход экономики к цифровой модели в XXI в. требует последовательного и целенаправленного изменения государственной системы управления с целью ее переориентации применительно к условиям рыночных отношений и растущей проблеме нехватки имеющихся ресурсов. По мере своей эволюции человечество выявляет новые природные ресурсы, эксплуатация которых становится необходимым атрибутом повседневного производства и жизнедеятельности. Возможность передачи информации на расстояние с помощью электромагнитных волн предоставляет безграничные возможности для внедрения технологических инноваций во все сферы деятельности современного государства и общества, стимулируя повышение ее качества и эффективности. Развитие цифровой экономики также требует сбора, передачи и обработки огромного объема различной информации. Данная тенденция позволяет отнести радиочастотный спектр (РЧС) к категории особо ценных природных ресурсов. Проведенный анализ текущего спроса на радиочастотный спектр выявил растущую проблему дефицита, обусловленную повсеместным внедрением новых технологий как общего, так и специализированного ведомственного пользования. Нехватка РЧС затрудняет доступ новым пользователям к эксплуатации ресурса за счет повышения транзакционных затрат, создавая проблемы стимулирования роста экономики. С целью проведения экономического анализа эксплуатации РЧС предлагается критерий эффективности его использования. Исследование отрицательных внешних эффектов, связанных с эксплуатацией ресурса, выявило существующие прямые и косвенные ограничения. Сформулированы предложения по применению экономических методов, создающих предпосылки для рационального задействования ресурса, в частности изменение формы собственности, введение платы за использование ресурса, делегирование определенных прав по управлению РЧС частному сектору, использование экономических критериев при принятии решения по распределению ресурса. Рассмотрены основные условия и достоинства внедрения коллективной собственности на использование РЧС для операторов сетей широкополосного доступа, обеспечивающей возможности совместного задействования ресурса и инфраструктуры. Предложено внедрение экономических критериев в практику государственной системы управления при принятии решения по перспективному использованию РЧС. В качестве косвенных ограничений обсуждается проблема электронного мусора, в частности, в космосе, и потенциально вредное влияние электромагнитных полей на человеческое здоровье при повышении интенсивности задействования ресурса. Для решения этой проблемы предлагается внедрение ежегодной платы за использование орбитально-частотного ресурса с операторов спутниковых сетей. Таким образом создается источник финансирования для программ по очистке космического пространства.

**Ключевые слова:** цифровая экономика, спектр, эффективность, внешние эффекты, транзакционные расходы

**Ссылка при цитировании:** Ноздрин В.В., Макаров В.В. Экономическая эффективность использования радиочастотного спектра в условиях развития цифровой экономики // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2018. Т. 11, № 5. С. 22–37. DOI: 10.18721/JE.11502

\* Мнение авторов не является официальной позицией Международного союза электросвязи.

## ECONOMIC EFFICIENCY OF USING THE RADIO FREQUENCY SPECTRUM IN THE EVOLVING DIGITAL INNOVATIVE ECONOMY

V.V. Nozdrin<sup>1</sup>, V.V. Makarov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> International Telecommunication Union. Geneva, Switzerland

<sup>2</sup> Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications,  
St. Petersburg, Russian Federation

Transition of economy to the digital model in the 21<sup>st</sup> century requires consistent and targeted modernization of the state management system with a view of reorienting it to a market environment and the growing problem of resource scarcity. As humankind evolves, it discovers new natural resources, exploiting them as an integral part of daily production and life. In this regard, data transmission by means of electromagnetic waves provides boundless opportunities for deploying technological innovations in all spheres of state and society to improve their quality and efficiency. Developing the digital economy also requires collecting, transmitting and processing huge volumes of different kinds of information. This means that the radio frequency spectrum (RFS) is a very valuable natural resource. Analysis of the current demand for RFS revealed a growing shortage problem, due to widespread introduction of new technologies, both for general and specialized use. Lack of RFS makes it difficult for new users to exploit a resource, increasing transaction costs, making it problematic to stimulate economic growth. In order to perform economic analysis of exploiting RFS, we propose a criterion for the efficiency of its use. Study of negative externalities of using RFS has revealed the existing direct and indirect limitations. We have formulated suggestions for applying economic methods allowing to use the resource rationally, in particular, changing the form of ownership, imposing fees for using the resource, delegating certain rights to manage RFS to the private sector, and making decisions on resource allocation based on economic criteria. We have considered the main conditions and advantages of introducing collective ownership for using RFS for broadband access network operators, providing opportunities for combined use of the resource and the infrastructure. We have also proposed introducing economic criteria into the practice of the state management system when making decisions on prospective use of RFS. As indirect restrictions, we have considered the problem of e-waste, in particular, in space, and the potentially harmful effects of electromagnetic waves on human health if the resource is used with increased intensity. To solve this problem, we propose to impose an annual fee on satellite network operators for using the orbital frequency resource. Thus, a source of funding is created for space cleaning programs.

**Keywords:** digital economy, spectrum, efficiency, externalities, transitional cost

**Citation:** V.V. Nozdrin, V.V. Makarov, Economic efficiency of using the radio frequency spectrum in the evolving digital innovative economy, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics, 11 (5) (2018) 22–37. DOI: 10.18721/JE.11502

*Введение.* Технологический прогресс ведет человечество к новому витку эволюции — становлению цифровой экономики. Любые начинания государства в этом направлении требуют развития соответствующей инфраструктуры связи и информатизации, обеспечивающей сбор, передачу и распространение огромных объемов различных данных с требуемым качеством. На основе такой технической платформы государство способно обеспечивать эффектив-

ное выполнение своих задач, а бизнес — внедрять современные инновации и услуги, стимулируя экономический рост, что, в конечном счете, будет повышать благосостояние общества. Данные тенденции стимулируют спрос на использование радиочастотного спектра (РЧС), ценного природного ресурса как со стороны существующих, так и внедряемых радиоэлектронных средств (РЭС), обостряя проблему его дефицита.

Проблема рационального задействования РЧС является многоплановой. С одной стороны, предоставление доступа к эксплуатации ресурса максимально возможному количеству пользователей приведет к наибольшему экономическому эффекту. С другой стороны, государственный администратор РЧС должен оценивать существующие ограничения задействования ресурса и понимать ответственность за свои действия, принимая текущие решения по использованию РЧС, с учетом их последствий, в частности прямых и косвенных отрицательных внешних эффектов. Рациональные действия по обеспечению частотного ресурса для развития новых технологий являются неотъемлемым требованием становления цифровой экономики в условиях текущей нехватки этого ценного природного ресурса. Особое внимание к данному вопросу, в частности, отражено в дорожной карте по реализации правительственной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» в части касающейся внедрения в России систем подвижной связи 5-го поколения.<sup>1</sup> Тем не менее, следует решать проблему комплексно, с учетом интересов не только радиосетей общего пользования, но и специализированных, ведомственных и научных операторов РЭС при условии выполнения всех прямых и косвенных ограничений.

Итак, поставлена задача: системное исследование экономических аспектов эксплуатации РЧС в условиях становления цифровой экономики.

*Методика исследования.* Методика базируется на технико-экономическом анализе развития радиоэлектронных систем различного назначения, изучении экономических исследований проблем эксплуатации природных ресурсов, систематизации и группировке статистических данных по задействованию РЧС и эмпирической оценке эффективности его использования.

**Основы цифровой экономики.** Переход к цифровой экономике должен обеспечить на перспективу сбалансированное решение проблем

социально-экономического развития, сохранение благоприятной окружающей среды и природно-ресурсного потенциала, удовлетворение потребностей в товарах и услугах и, в конечном счете, рост благосостояния общества в условиях ограниченности имеющихся ресурсов. Управленческие действия, осуществляемые как с участием человеческого интеллекта, так и полностью автоматизированные, будут предоставлять наиболее рациональные решения поставленных задач на всех уровнях, начиная с отопления частного дома и заканчивая сохранением экосистемы Мирового океана.

Примеры частного внедрения отдельных компонентов цифровой экономики в различных отраслях уже сейчас демонстрируют впечатляющие возможности современных достижений человечества в области информатизации и связи с точки зрения оптимизации процессов производства и жизнедеятельности [1]. В частности, в ряде исследований ученые приходят к следующим заключениям:

- развитие интеллектуальной системы дорожного транспорта, основанной на внедрении беспилотных средств, снизит транспортные расходы на 17–20 % и потребление топлива на 30 % [2];
- учет данных, получаемых со спутников дистанционного зондирования нового поколения, приведет к экономии электроэнергии и природного газа в США в 2020 г. на сумму около 2,56 млрд долл. [3];
- повышение пропускной способности железнодорожных путей за счет внедрения современных систем регулирования движения поездов, завязанных на использование ведомственных радиосетей, составит от 50 до 200 % [4];
- использование беспилотных комбайнов в сельском хозяйстве позволит снизить удельные затраты на производство зерна более чем два раза [5].

Важным аспектом перехода к цифровой экономике является создание соответствующей технической платформы, которая могла бы обеспечивать сбор, передачу и взаимообмен между различными элементами сетей различного вида информации с очень высокими требованиями по скорости и качеству передачи информации на

<sup>1</sup> Цифровая экономика Российской Федерации / Правительство Российской Федерации. 28 июля 2017 г.

основе технологии интернета вещей. В большинстве случаев выбор экономически эффективного плана развития информационной широкополосной экосистемы не оставляет другой возможной альтернативы ее технической реализации, кроме как внедрение РЭС. Как отмечено в указанной программе, в этой связи особые требования на государственном уровне предъявляются к внедрению сетей систем подвижной связи 5-го и последующих поколений. В документе подчеркивается необходимость развития современных спутниковых систем для навигации и дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Текущие технологические тенденции дополнительно указывают на то, что специализированные радиосети будут играть еще более весомую роль в развитии транспортных отраслей, обеспечивая безопасность движения, контроль за маршрутом транспортных объектов, вызов служб спасения в случае экстренной ситуации, что в результате создаст условия для массового внедрения беспилотных аппаратов. Данный тренд будет касаться не только специализированного или военного применения, но и выполнения стандартных операций по перевозке грузов или пассажиров. Параллельно внедрение полностью или частично автономных устройств следует ожидать в сельском и лесном хозяйствах. Рассмотрим, как это повлияет на спрос на использование РЧС.

**Спрос на радиочастотный спектр.** Все системы радиосвязи классифицируются по радиослужбам, иными словами, разбиты на популяции РЭС на основе схожести основных технических параметров. Первым шагом в деле продвижения новой радиотехнологии, требующей эксплуатации дополнительного радиочастотного ресурса на определенных условиях, является распределение необходимой полосы РЧС. Данная задача решается всемирными конференциями радиосвязи (ВКР) под эгидой Международного союза электросвязи (МСЭ) на основе изменения регламента радиосвязи (РР). Национальные администрации должны учитывать принятые решения в соответствующих национальных нормативных и правовых актах.

По мере становления радиосвязи задача удовлетворения спроса на использование РЧС

решалась довольно просто — для удовлетворения новых потребностей радиослужб распределялись свободные или малозагруженные полосы. При этом предпочтение отдавалось решениям, обеспечивающим эксклюзивные права на определенную полосу для конкретной радиослужбы, так как в таком случае она имела меньше ограничений для развития. Указанная ситуация создавала благоприятные условия для быстрого внедрения, так как проблемы использования РЧС нужно было решать между РЭС одной службы, что с технической точки зрения проще в реализации. Уже в конце XX в. ситуация кардинально изменилась. Нераспределенного РЧС в технологически доступном к настоящему времени диапазоне до 275 ГГц уже нет, поэтому ВКР должны принимать технические и регламентные положения, обеспечивающие возможность совместного использования РЧС различными службами. Результаты оценки текущей ситуации по распределению РЧС между основными службами в районе 1 (Европа, Африка, Россия и страны бывшего СССР) в диапазоне частот до 100 ГГц представлены в табл. 1.

Как показано в табл. 1, суммарные распределения радиочастот для основных радиослужб в диапазоне до 100 ГГц, иными словами, спрос на использование РЧС, уже превышает фактическую ширину РЧС более чем в два раза, т. е. один и тот же участок РЧС в среднем используется двумя или тремя радиослужбами. На самом деле ситуация обстоит намного сложнее. Во-первых, рассмотрено только 9 из 41 существующей радиослужбы. Во-вторых, в некоторых случаях ряд полос РЧС эксплуатируется только одной радиослужбой на эксклюзивной основе. Невозможность совместного использования с другими службами объясняется или технической спецификой работы данной категории РЭС, как в случае с пассивными системами ДЗЗ, или специальными требованиями по защите от помех, применяемыми к системам обеспечения безопасности человеческой жизни. Одним из примеров является полоса 406–406,1 МГц, которая распределена на всемирной основе для использования радиобуями передачи сигналов уведомления места бедствия спутниковой системы Коспас–Сарсат. Специальная всемирная программа радиоконтроля МСЭ обеспечивает защиту этой полосы РЧС от любых других применений.

Таблица 1

Распределение РЧС в диапазоне до 100 ГГц в районе 1

Spectrum allocation up to 100 GHz in region I

| Службы                         | Суммарное распределение РЧС в районе 1, МГц | Дополнительное распределение ВКР-15, МГц             |
|--------------------------------|---|--|
| Подвижная                      | От 981 до 1181                              | До 979 (в зависимости от страны и сценария нагрузки) |
| Фиксированная                  | 61000                                       | Без изменений  |
| Фиксированная спутниковая      | 89600                                       | От 250 до 300  |
| Подвижная спутниковая          | 54189                                       | 250 (дополнительно)                                  |
| Радиовещательная спутниковая   | 6590  | Без изменений  |
| Спутниковая исследования Земли | 5500  | 660 (дополнительно)                                  |
| Радиовещательная (ТВ)          | 469   | Без изменений  |
| Морские                        | 30  | Без изменений  |
| Авиационные                    | 2270  | 200  |
| Всего                          | До 220829                                   | До 2389  |

И с т о ч н и к : Составлено авторами.

В будущем ситуация с перегрузкой РЧС будет только осложняться. В текущий период наибольший рост спроса на использование РЧС следует ожидать со стороны подвижной службы. Региональные прогнозы отличаются друг от друга, но, в основном, указывают на значительный прогнозируемый рост нагрузки в этих сетях до 2021 г., который в странах западной Европы может достигать 900 % [6]. Несмотря на возможности современных технологий сжатия информации, прогресс внедрения будущих стандартов международной подвижной связи (ИМТ) зависит от наличия дополнительного РЧС.

Опрос, проведенный среди операторов подвижной связи по поводу основной проблемы при переходе к будущим поколениям ИМТ, показал очень интересные результаты [7]. Более 30 % опрошенных респондентов считают, что она будет связана не столько с модификацией самих базовых станций, а сколько с необходимостью замены транспортной инфраструктуры, обеспечивающей подключение базовых станций к опорной сети за счет систем фиксированной службы. Существующие оценки показывают, что в неко-

торых случаях требуемая скорость передачи таких транспортных магистралей должна достигать 10 ТБит/с. Традиционно используемые стандарты радиорелейных линий в диапазонах 6–13 и 15–42 ГГц в связи с ограниченностью доступного РЧС такие скорости обеспечивать не в состоянии. В этой связи сейчас активно идет разработка оборудования и исследуются возможности использования более высоких диапазонов частот, в частности 45–52, 57–64, 66–76, 81–86, 90–110, 130–175 ГГц. ВКР 2019 г. будет рассматривать возможность дальнейшей эволюции фиксированной службы в диапазоне 275–450 ГГц, который еще вообще не был распределен. Помимо этого повышение спроса со стороны фиксированной службы можно ожидать в связи с развитием нескольких проектов, направленных на решение проблемы создания широкополосной сети на основе стратосферных платформ, работающих в рамках фиксированной службы.

Фиксированная спутниковая служба (ФСС) предоставляет экономически эффективные решения, обеспечивающие передачу информации в отдаленные и малозаселенные районы, а также

вещания на большие территории. Технологические тенденции в области производства, запуска и эксплуатации спутников, такие как повышение пропускной способности одного космического аппарата до 1 ТБит/с, снижение производственного цикла сборки спутника, увеличение сроков эксплуатации за счет перехода к полностью электрическому питанию, снижение стоимости запусков за счет многоразовых ракетносителей, а также развитие конкуренции на рынке в связи с появлением новых спутниковых операторов, приводят к значительному снижению стоимости аренды спутниковой емкости, составляющей от 35 до 60 % в 2015–2016 гг. [8]. Технологической тенденцией является также использование негеостационарных орбит. Это связано как со значительной перегрузкой геостационарной орбиты, так и со стремлением устранения недостатков ее задействования – снижением задержки при передаче информации и упрощением абонентского оборудования. Операторы ФСС пытаются быть ближе к абоненту, с тем чтобы найти себе новые рынки. Одним из направлений развития в этой области является оказание услуг широкополосной связи на морском, воздушном и дорожном транспорте. Еще одно направление – создание огромных спутниковых группировок, состоящих из тысяч низкоорбитальных спутников, обеспечивающих непосредственное широкополосное подключение к сети Интернет через дешевые абонентские устройства в глобальном масштабе, такие как OneWeb и Starlink.

Ряд полос РЧС, которые распределены для ФСС в течение недавнего времени, в частности в X (8/12 ГГц) и Ka (27/40 ГГц) диапазонах, предоставили новый ресурс для дальнейшего развития спутниковых сетей связи. Основная задача международного регулирования сегодня состоит в необходимости стимулировать его эффективное использование. Помимо традиционной проблемы совмещения спутников, расположенных на геостационарной орбите, уже на ближайшей ВКР 2019 г. должна быть решена еще более сложная техническая задача – разработка технических условий использования РЧС негеостационарными сетями в Ka и V (40/75 ГГц) диапа-

зонах для обеспечения возможности совместного использования ресурса как наземными службами, так и спутниковыми системами на различных орбитах.

Распределенный для подвижной спутниковой службы (ПСС) в настоящее время ресурс обеспечивает работу четырех глобальных сетей, например Инмарсат и Иридиум. Услуги ПСС востребованы в основном специализированными группами абонентов, в частности моряками, авиаторами и различными государственными (например, силовыми) ведомствами. Технологическое развитие позволяет значительно улучшить эксплуатационные характеристики абонентских приемников. Тем не менее, в связи с необходимостью обеспечивать высокую энергетику бортовых приемников и ограниченностью используемого спектра будет экономически невыгодно и зачастую невозможно предоставлять на абонентское устройство ПСС те же широкополосные услуги, как и при работе с наземной сетью. Это дает право предполагать, что в ближайшей перспективе дополнительного спектра для ПСС не понадобится.

Схожая ситуация сложилась в деле эксплуатации РЧС радиовещательной спутниковой службой (РСС). Несмотря на то, что РСС пользуется большим спросом, ежегодно увеличивая количество абонентов, современные технологии кодирования позволяют увеличивать число цифровых каналов современных форматов без необходимости дополнительного РЧС. Относительно недавно распределенная для РСС в районе 1 полоса 21,4–22 ГГц на практике еще загружена очень мало, т. е. обеспечивается ресурс для новых систем.

Спутниковая служба исследования Земли (ССИЗ) имеет довольно привилегированное положение среди других служб. Обычно научные миссии, системы ДЗЗ, платформы сбора метеорологической информации, работающие в рамках ССИЗ, планируются задолго до запуска. Каждый космический аппарат имеет специфические характеристики, по сути являясь уникальным, поэтому технологический процесс его сборки может длиться до 7–8 лет. Полосы РЧС

для пассивного наблюдения резонансных частот, которые предоставляют информацию о различных характеристиках Земли, известны. В этой связи все полосы, задействованные или планируемые к использованию для пассивных датчиков ССИЗ, в настоящее время уже определены в РР. Основная текущая задача в этой области эксплуатации РЧС – защита данных полос от влияния новых систем других служб радиосвязи. В будущем спрос на дополнительные полосы РЧС может возникнуть в связи с тем, что Всемирная метеорологическая организация прорабатывает вопрос о новом ресурсе для всемирной системы контроля за космической погодой с целью анализа влияния солнечной активности на человеческую жизнедеятельность и атмосферу Земли. Планируется, что этот вопрос будет обсуждаться на ВКР 2023 г.

Следует констатировать, что эволюция развития радио и проводных технологий ведет к закату наземной радиовещательной службы для распространения телевизионных программ. Срок ее существования определен только желанием и возможностью государства финансировать эту морально устаревшую технологию по каким-либо, за исключением экономических, причинам. Постепенно абоненты будут все больше и больше отказываться от услуг эфирного телевидения в пользу широкополосных сетей радиодоступа, оптико-волоконных сетей, сетей кабельного телевидения или спутниковых систем. Поэтому в ближайшее время следует повсеместно ждать очередных шагов по перераспределению РЧС от этой службы другим, более эффективным, как это уже случилось в большинстве стран мира в контексте так называемых полос «цифрового дивиденда». Ряд европейских стран уже в ближайшие годы планируют полное отключение цифрового эфирного телевидения и перераспределение соответствующего РЧС другим службам.

Морская служба до последнего времени развивается за счет использования спутниковых технологий, а также закрепленного за ней планового частотного ресурса в диапазонах СЧ, ВЧ и ОВЧ. В диапазонах СЧ и ВЧ до сих пор исполь-

зуются аналоговые методы передачи, и перспективы их задействования пока неясны, несмотря на то, что диапазон ВЧ имеет огромные преимущества с точки зрения распространения радиоволн. Полоса 156–174 МГц является материнской как для развития морской, так и, в большинстве стран мира, речной связей. Последние изменения правил использования касаются возможности задействования определенных каналов как для наземного, так и спутникового использования, или изменения канальных планов в связи с переходом к цифровым методам передачи. Тем не менее, используемый для морской службы РЧС уже сильно перегружен, и новые внедрения в области морской радиосвязи, такие как электронная навигация, беспилотные суда и интернет вещей, несомненно будут приводить к необходимости поиска новых полос частот. Следует еще раз особо подчеркнуть, что морские службы напрямую обеспечивают безопасность мореплавания и охрану человеческой жизни на море и внутренних водных путях.

Воздушная служба идет в том же направлении развития, как и морская. Основным различием является необходимость обеспечения сложной системы радиоопределения (системы навигации, посадки, контроля, обзора и т. д.). В ответ на запрос правительства Малайзии после трагедии с исчезновением рейса МН-370 ВКР 2015 г. определила дополнительный диапазон частот для развития спутникового сегмента системы глобального слежения за самолетами. Доступные для воздушной службы РЧС в диапазонах СЧ, ВЧ и ОВЧ уже значительно перегружены существующими РЭС. Прогнозируемое увеличение числа самолетов, предполагаемая реализация Глобального плана обеспечения авиационной безопасности, принятого Международной организацией гражданской авиации в 2015 г., поддержка внедрения беспилотных самолетов будут стимулировать спрос на дополнительный РЧС со стороны данной категории пользователей.

Описываемая ситуация и прогноз роста спроса формулируют необходимость решения сложной экономической задачи при использова-

нии ограниченных ресурсов – внедрение методов, направленных на оптимизацию эксплуатации при выполнении существующих как прямых, так и косвенных ограничений, обусловленных, в частности, отрицательными внешними эффектами.

**Эффективность использования радиочастотного спектра.** Традиционно администраторы спектра при принятии решения по задействованию определенной его полосы руководствовались техническими критериями эффективности использования РЧС, в частности:

- обеспечение технической простоты условий эксплуатации РЧС;
- обеспечение отсутствия взаимных помех, вызывающих снижение качества предоставляемых услуг;
- стимулирование оптимальной технической загрузки используемого ресурса с точки зрения максимизации удельного объема передаваемой информации.

Проблема нехватки РЧС приводит к необходимости применения экономических критериев, которые будут помогать администраторам РЧС в решении данной проблемы и внедрении новых технологий в условиях дефицита ресурса. В этой плоскости следует основываться на трех основных положениях:

- эффективность построения сети, т. е. обеспечение оптимального объема РЧС, для того чтобы снизить капитальные затраты на ее развитие. Это положение также относится и к производству радиооборудования;
- динамическая эффективность, отражающая степень задействования ресурса при таких условиях, которые будут обеспечивать долгосрочное технологическое развитие за счет внедрения инноваций;
- эффективность распределения ресурса, основанная на критерии по Парето, т. е. предоставление доступа к ресурсу пользователям, которые обеспечивают максимальный экономический эффект для общества.

Проблема математического решения поставленной задачи усложняется многомерностью па-

раметров, которые должны учитываться, что ведет к бесконечному множеству решений, которые могут быть оптимальными по одним критериям и неоптимальными по другим. Чтобы руководствоваться на практике эмпирическим критерием, можно за экономическую эффективность использования РЧС принять отношение суммарного эффекта от эксплуатации данного ресурса к затратам, связанным с получением и условиями права на его использование. Данное определение подпадает под общую классическую канву эффективности современного государства с устойчивой экономикой: «Экономический рост и развитие страны в основном не зависят от типа существующего правительства, если расходы на транзакции в экономической и политической сферах равны нулю» [9]. В общем виде можно записать:

$$y_k(x_k, t) = \frac{\sum_{i=1}^N \varphi_i(x_k, t)}{\sum_{i=1}^N CT_i(x_k, t) + \sum_{i=1}^N E_i},$$

где  $y_k(x_k, t)$  – экономическая эффективность при использовании полосы РЧС шириной  $x_k$   $N$  системами одной службы в момент времени  $t$ ;

$x_k$  – ширина полосы частот, распределенная для  $k$ -й службы;

$N$  – количество радиосистем (для некоторых полос РЧС целесообразнее рассматривать количество операторов, работающих в рассматриваемой полосе), использующих полосу частот  $x_i$ .  $N$  может зависеть от времени, так как по мере технологического развития возможности совместного использования РЧС разными РЭС будут возрастать. Таким образом, интенсивность загрузки ресурса, которую можно определить как удельное количество информации, передаваемое в эталонной полосе, будет также повышаться;

$\varphi_i(x_i, t)$  – эффект использования РЧС  $i$ -й системой. Оценка является крайне затруднительной и должна проводиться с учетом специфики задействования конкретной полосы. Применительно к коммерческим операторам РЭС, работающим на рынке услуг общего пользования, можно применять косвенную оценку, как, на-

пример, вклад в ВВП или размер выплачиваемых налогов. Тем не менее, большая часть используемого в настоящий момент спектра используется специализированными и государственными операторами, и эксплуатация РЧС является необходимым условием работы систем обеспечения национальной обороноспособности, защиты человеческой жизни и окружающей среды, борьбы против глобальных проблем, таких как изменение климата и исчерпание природных ресурсов. Согласно оценкам метеорологов, радиопомеха спутнику ДЗЗ может вызвать задержку в установлении точного прогноза за счет неверных входных данных от 3 до 6 ч. Экономический эффект в данном случае может быть или незамеченным, или колоссальным. Исходя из того, что создание РЭС требует больших капитальных затрат, в рамках поставленной задачи можно исходить из того, что любая РЭС приносит полезный эффект. Оптимизация задействования РЧС при этом достигается за счет повышения количества пользователей ресурса;

$CT_i$  – суммарные транзакционные издержки, определяемые затратами на получение доступа к использованию РЧС для  $i$ -й радиосистемы. Они включают в себя затраты на получение соответствующих разрешений и платежи за использование РЧС, а также должны учитывать временные издержки, вызванных выполнением всех формальностей и получением соответствующих административных решений;

$E_i$  – издержки, связанные с отрицательными внешними эффектами, создаваемыми при эксплуатации РЧС  $i$ -м РЭС. Они вызваны тем, что обеспечение приемлемого качества работы нескольких РЭС ведет к необходимости согласования их технических параметров с целью исключения возможности создания взаимных вредных помех. В некоторых случаях результатом такого согласования является заключение о том, что технические режимы работы существующей системы не создают возможности совместного использования, приводя к отказу в допуске к РЧС для потенциального оператора.

Таким образом, задача администратора РЧС заключается в максимизации суммарного эконо-

номического эффекта для общества за счет обеспечения доступа к его использованию максимально возможного количества пользователей при условии выполнения существующих ограничений, а также снижения издержек, связанных с задействованием ресурса.

Применение экономических методов не является панацеей решения всех текущих недостатков существующей системы управления РЧС в связи со сложной технической природой его задействования. Тем не менее, они являются неотъемлемым инструментом, позволяющим бороться с нехваткой этого ценного ресурса. Одной из основных задач регулятора является борьба против внешних отрицательных эффектов, ограничивающих возможность эксплуатации ресурса [10].

**Методы повышения эффективности использования радиочастотного спектра.** По мере роста интенсивности эксплуатации РЧС возможности совместного использования существенно снижаются в связи с увеличением случаев появления взаимных помех между различными РЭС. Необходимость выполнения технических условий, обеспечивающих электромагнитную совместимость, требует дополнительных согласований и координации, ведет к удорожанию стоимости сетевого и оконечного оборудования, снижает качество предоставляемых услуг и, соответственно, повышает издержки. Хорошим примером может служить ситуация, которая сложилась в настоящее время в отношении эксплуатации полосы 5600–5650 МГц. ВКР 2012 г. определила условия ее совместного использования метеорологическими радарными и системами WiFi. На практике оказалась, что в Европе около 50 % производителей оборудования WiFi или не устанавливают требуемое для совмещения устройство динамического переключения частот, или его легко отключить, так как его наличие повышает стоимость абонентского устройства и снижает качество их работы [11]. В результате около 72 % метеорологических радаров испытывают вредные помехи.

В современных условиях администратор РЧС должен решать такие важные задачи, как выбор

наиболее ценного пользователя РЧС и создание условий, стимулирующих рациональное использование ресурса. К числу общепринятых экономических методов, применяемых по всему миру, относятся введение платы за использование РЧС, проведение аукционов прав на использование РЧС, приватизация РЧС и создание вторичного рынка прав на его задействование [12]. Тенденции развития рынков услуг связи и определенных отраслей диктуют еще одно возможное решение вопроса оптимизации загрузки ресурса – коллективную собственность. Коллективная собственность как одна из форм частной собственности в ряде случаев может вполне справиться с проблемой неэффективного использования ресурса. Ее основные принципы, которые широко используются в мировой практике, и не только применительно к использованию природных, но и других ресурсов, очень четко сформулированы в [13]. В частности, к ним относятся:

- общественный договор между затронутыми сторонами, определяющий правила использования;
- конституция, закрепляющая этот договор;
- законодательство, определяющее ответственность за нарушение установленных договоренностей;
- судопроизводство и администрация, осуществляющие контроль за выполнением законодательства и применение штрафных санкций к нарушителям.

Основным выводом ряда исследований является то, что коллективное управление ресурсом физическими или юридическими лицами, преследующими свою личную выгоду, может при выполнении определенных условий привести к максимальному экономическому эффекту. Данными условиями являются [14]:

- четкое определение границ ресурса и доли каждого собственника, которую он имеет право изъять из коллективного пользования;
- правила распределения, ограничивающие место, время, технологию и/или количество ресурса;
- возможность участия каждого из собственников в определении правил пользования ресурсом;
- контроль со стороны собственников за выполнением установленных правил;

- санкции против нарушителей принятых правил;
- определение процедур по решению конфликтов как внутри коллективного сообщества, так и между сообществом и властями;
- отсутствие внешнего вмешательства, в частности, со стороны государственных институтов в процесс принятия решений, касающихся коллективной собственности.

В международной практике управления РЧС уже существует несколько примеров коллективного подхода к управлению РЧС. В соответствии с резолюцией 609 (ВКР 2007 г.) разработка и согласование совместного использования полосы 1164–1215 МГц радионавигационной спутниковой службой практически были отданы на откуп операторам соответствующих сетей при условии выполнения ими требований верхнего уровня, установленных ВКР. Ряд полос РЧС, предназначенных для ССИЗ, эксплуатируется на основе соглашений группы по координации космических частот, которая объединяет все космические агентства мира, при этом даже не обладая формальным статусом.

В 1999 г. Научно-исследовательский институт радио представлял в Госкомсвязь России свои соображения о том, что создание нескольких параллельных инфраструктур сотовой связи в условиях ограничения частотного и других ресурсов в стране с огромной территорией, такой как Россия, экономически не эффективно. Вопросы конкуренции должны решаться на уровне услуг, а не на уровне инфраструктуры сетей или приоритетных условий доступа к РЧС. В тот момент предложения были не приняты. Сейчас, когда удельная и абсолютная прибыль сотовых компаний значительно снижаются, сами операторы стали предлагать различные концепции совместного использования РЧС, так называемого лицензируемого совместного доступа (LSA) [15]. Это, в частности, отражено в законе О связи, который, правда, говорит не о индивидуальной или коллективной собственности, а вводит понятие «договор о многосубъектном использовании радиочастотного спектра».<sup>2</sup> При этом существующие положения

<sup>2</sup> О связи : Федер. закон № 126-ФЗ от 07.07.2003 г. (в ред. От 01.06. 2018 г.).

данного закона не оговаривают обязательное выполнение условий коллективного использования, в частности возможность перепродажи своей доли, выбор условий пользования без согласования с государственным администратором и т. д. Тем не менее, на практике такое имеет место.

Наиболее вероятными кандидатами для применения коллективного подхода являются полосы, используемые для систем подвижной связи и широкополосного доступа. В том случае, если принято решение по оптимальному количеству операторов на рынке, дополнительные полосы РЧС могут предоставляться сформировавшемуся коллективу для использования без указания конкретных номиналов частот, но с указанием доли предоставляемой для использования полосы каждому из совладельцев. Аналогичный подход может быть применен к любой полосе в случае, если количество операторов ограничено. Получение доступа к ресурсу для новых операторов может обеспечиваться за счет разрешения механизма купли-продажи или аренды.

Другой оригинальный механизм предоставления прав на использование РЧС был реализован в США. Так, информация о возможности задействования полосы публикуется и объявляется сбор заявок от потенциальных операторов. По истечении установленного времени все поступившие заявки проверяются на техническую совместимость. В случае отрицательного заключения по этому вопросу администратор дает время заявителям, для того чтобы они сами договорились о приемлемых условиях совместного задействования искомой полосы. Если по истечении этого времени договоренность между заявителями не достигнута, вся полоса делится поровну между всеми претендентами.

Коллективная собственность имеет и технические предпосылки, в частности в связи с внедрением РЭС новых поколений. Современные технологии характеризуются оперативными изменениями конфигурации сетей под условия спроса на услугу, оперативными перенастройками технических параметров оборудования и гибкостью по использованию доступных радиоканалов и оптимизации маршрутов доставки информации, в частности в счет использования совме-

стной инфраструктуры. В том случае, если будут сохраняться традиционные подходы администрирования, когда любое изменение технических параметров требует обязательной регистрации и согласования, то операторы должны будут в течение ближайшего десятилетия огромную часть своих ресурсов тратить на эту бессмысленную деятельность. Введение коллективной собственности избавляет как государство, так и пользователей РЧС, от этих дополнительных сложностей.

По мере развития технологического прогресса граница активно используемого диапазона РЧС отодвигается все дальше и дальше. В настоящее время РЧС от 3 кГц до 100 ГГц уже активно используется, а диапазон частот 100–275 ГГц имеет определенный потенциал применения, хотя еще мало загружен существующими РЭС. В рамках подготовки к ВКР 2019 г. МСЭ исследует перспективное использование полосы 275–450 ГГц для фиксированной и подвижной службы [16, 17]. Но следует понимать, что в связи с особенностями распространения радиоволн в данном диапазоне частот, в частности, с огромным затуханием и феноменом многолучевости, РЭС будут иметь очень ограниченный радиус действия. Экономические методы не могут противодействовать законам природы и не могут помочь в разрешении этого вопроса.

Серьезным административным ограничением использования РЧС становится блочное распределение полос РЧС для радиослужб. Любая РЭС может быть реализована только в рамках полосы частот, административно закрепленной на международном и/или национальном уровне к радиослужбе, к которой данная радиосистема относится. По мере загрузки РЧС решение вопроса определения дополнительного ресурса для внедрения новых технологий сталкивается с проблемой «бумажных» распределений.

Несмотря на то, что многие законодательные акты декларируют, что регулирование РЧС направлено «на ускорение внедрения перспективных технологий и стандартов», на практике в большинстве случаев решение о дополнительном использовании полосы РЧС на международном и национальном уровнях исходит исключительно



из защиты уже существующих служб. При этом их экономическая эффективность практически никогда не рассматривается, а вопрос об исключении существующих распределений РЧС поднимается крайне редко. В результате существующая таблица распределения РЧС полна «бумажных» распределений, которые или сделаны про запас или были задействованы в прошлом для морально и технически устаревших систем. Одним из примеров сложившейся ситуации является текущие исследования МСЭ по разработке технических условий задействования ряда полос РЧС ФСС для линий телеуправления беспилотными самолетами. В настоящее время рассматриваемая полоса распределена для подвижной службы. Обмен информацией между заинтересованными рабочими группами показал, что международных стандартов подвижной службы в этом диапазоне не существует, а анализ международной базы данных частотных присвоений выявил несколько РЭС, расположенных в одной стране мира и зарегистрированных в 1970-х гг. Существующая практика работы МСЭ требует разработки условий технического совмещения будущей всемирной системы управления беспилотными самолетами с несколькими, вероятнее всего, давно несуществующими, РЭС, что несомненно сделает ее более дорогой и/или менее технически надежной.

Решение данной проблемы требует некоторых изменений в действующих принципах проведения исследований МСЭ, в частности необходимо пересмотреть приоритеты при принятии решений. Следует периодически проводить ревизию задействования полос РЧС между службами, с тем чтобы выявлять перспективное использование и исключать работу устаревших или прекративших свою деятельность систем. Технические критерии должны дополняться экономическими, которые будут помогать принимать наиболее рациональные решения по эксплуатации РЧС, в частности позволяя сравнивать экономический эффект от использования конкретной полосы при различных вариантах ее загрузки различными радиослужбами [17] и оценивать потенциальный экономический эффект для новой системы от устанавливаемых ограничений.

Еще одним косвенным ограничением использования РЧС может стать неблагоприятное воздействие электромагнитных полей искусственного происхождения на здоровье человека. Дальнейшее бесконтрольное повышение интенсивности эксплуатации РЧС может оказывать вред человеческому здоровью. В настоящий момент установлено два вида ограничений – основные ограничения и контрольные уровни. Основными ограничениями называются нормы по воздействию на человека изменяющихся во времени электрических, магнитных и электромагнитных полей, которые напрямую основаны на их доказанном влиянии на здоровье человека, тем не менее их трудно измерить (например, плотность тока в организме человека) [18]. Контрольные уровни выводятся из основных ограничений и выражаются в легко измеримых величинах. Они устанавливаются значения максимально допустимой величины излучения для конкретных РЭС. Считается, что при выполнении контрольных уровней общее влияние на организм не превышает установленных основных ограничений. Повышение плотности расположения РЭС различного назначения в определенных зонах обслуживания может ставить под вопрос жизнеспособность сложившейся практики, так как необходимо будет учитывать суммарную напряженность нежелательных воздействии излучений. Уже в ближайшем будущем изменение электромагнитной обстановки может потребовать более решительных мер со стороны управляющих эксплуатацией РЧС по защите здоровья населения, что, в свою очередь, потребует серьезного внимания со стороны ответственных государственных органов.

Другой проблемой, вызванной использованием РЧС, является проблема электронного мусора, или, другими словами, огромного количества устаревшего или вышедшего из строя сетевого и абонентского оборудования радиосвязи. Только за 2016 г. общий объем электронного мусора в мире достиг 44,7 млн т. [19]. Несмотря на то, что его переработка не относится к компетенции управляющих РЧС, их деятельность может значительно влиять на решение

данной проблемы. В соответствии с установками МСЭ объём электронного мусора должен быть снижен к 2020 г. на 50 %, в частности за счет экологически нейтрального дизайна, выбора нетоксичных и поддающихся вторичной переработке материалов, увеличения срока действия оборудования [20]. Существующие тенденции показывают, что развитые страны, пытаясь решить эту проблему, нашли очень простой путь – экспорт экологического кризиса. Они продают устаревшее радиооборудование по демпинговым ценам в развивающиеся или медленно адаптирующиеся к технологическим изменениям страны. Управляющие РЧС должны решать эту проблему за счет своевременного запрещения задействования полос РЧС устаревшими технологиями, разработки экологических требований к сетевому и абонентскому оборудованию, продаваемому на рынке, стимулирования гармонизации полос РЧС с целью обеспечения взаимодействия оборудования различных стандартов.

Экологические ограничения касаются не только оборудования на Земле, но и космического мусора. В настоящее время насчитывается около 1800 работающих спутников [21]. Отрабатывший свой срок спутник переводится на другую орбиту, перенося решение проблемы по утилизации на следующие поколения. Помимо этого, околоземное космическое пространство уже заполнено обломками искусственного происхождения числом порядка 20 000 размером больше 10 см или около 500 000 – от 1 до 10 см. Ситуация будет кардинально ухудшаться, так как помимо традиционно используемой для предоставления услуг связи геостационарной орбиты существуют планы запуска огромных спутниковых группировок, обеспечивающих широкополосный доступ, на негеостационарные орбиты. В рамках реализации существующих 14-ти таких проектов предлагается запустить более 10000 спутников [22]. Другой тенденцией является широкое внедрение так называемых микроспутников, используемых для различных научных и производственных целей, число которых достигнет 2600 в ближайшие 5 лет [23]. Проблема широко обсуж-

дается, но главным вопросом является определение источника финансирования программ по сбору мусора из космоса. Задача может быть решена за счет введения ежегодной платы за использование РЧС спутниковыми системами, предложенной для повышения эффективности использования данного ресурса [24]. Целесообразно будет перечислять собранные средства в специально созданный фонд под эгидой международной организации, который будет финансировать программы по очистке космического пространства. Эти меры могут обеспечить внедрение практических мер, решающих проблему космического мусора, и повысить эффективность использования орбитально-частотного ресурса спутниковыми системами.

*Результаты исследования.* Итак, проведен анализ спроса на использование РЧС и формализована проблема его нехватки. Рассмотрены составляющие экономической эффективности использования РЧС и разработан соответствующий критерий. Предложены экономические методы, стимулирующие оптимальную эксплуатацию ресурса в условиях существующих прямых и косвенных ограничений.

*Выводы.* Успешная реализация государственной программы цифровой экономики должна быть основана на оптимизации использования всех задействованных ресурсов. Одним из таких ресурсов является радиочастотный спектр, обеспечивающий возможность развития требуемой технической инфраструктуры связи и информатизации. Рациональное использование РЧС оказывает огромное значение на экономическую эффективность всех современных отраслей народного хозяйства с точки зрения оптимизации процессов производства и жизнедеятельности.

Проведенный анализ показал, что при высокой текущей загрузке РЧС спрос на него стремительно растет. Данная тенденция обусловлена, прежде всего, бурным развитием систем подвижной связи общего пользования, в частности сетей будущих стандартов ИМТ.

Помимо этого, переход к новым технологиям определил рост спроса радиосистем ведомственного подчинения.

Решение проблемы эффективного использования ресурса обуславливает необходимость выбора соответствующего критерия. Проанализированы технические и экономические критерии эксплуатации РЧС. Сделан вывод, что многоплановость и техническая сложность задействования РЧС не позволяют найти математически оптимальное решение по загрузке РЧС. Предложенный эмпирический критерий экономической эффективности использования РЧС дает возможность эмпирической оценки при принятии решения по эксплуатации конкретной полосы.

Совершенствование системы управления РЧС требует разработки современного законодательства, которое, в частности, закладывало бы юридические основы для введения частной и коллективной собственности на использование ресурса.

Предложенные экономические методы повышения эффективности РЧС связаны общей идеей – внешние отрицательные издержки должны быть интернализированы. В частности, в качестве экономических мер предлагается разрешение коллективной формы собственности на использование РЧС, введение экономических критериев и приоритетов при принятии решения по использованию РЧС для нового стандарта.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Алексеев А.Л., Блатова Т.А., Макаров В.В., Шувал-Сергеева Н.С.** Инновационные бизнес-модели в цифровой экономике и их конкурентные преимущества. // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 9. С. 100–104.
- [2] Report ITU-R M.2228-1. Advanced intelligent transport systems (ITS) radiocommunications (Современная интеллектуальная транспортная система). 2015.
- [3] Report ITU-R RS.2178. The essential role and global importance of radio spectrum use for Earth observations and for related applications (Существенная роль и глобальная важность использования радиочастотного спектра для наблюдений Земли и сопутствующих применений). 2010.
- [4] **Розенберг Е.Н., Абрамов А.А., Батраев В.В.** Интегральное регулирование движения поездов // Железнодорожный транспорт. 2017. № 9.
- [5] **Schwarz H.P.** Precise positioning technology in agriculture and forestry (Технологии точного позиционирования в сельском и лесном хозяйстве). Munich Satellite Navigation Summit Proceedings. 2016.
- [6] Report ITU-R M.2370. IMT Traffic estimates for the 2018s 2020 to 2030 (Расчет трафика в системах IMT в период с 2020 до 2030 г.). 2015.
- [7] **Nava P.** IMT Backhaul (Опорные сети для IMT). ITU/SPBPU Seminar for CIS and Europe. St. Petersburg, Russia, 2018.
- [8] Satellite Capacity Pricing Index (Индекс платы за аренду спутниковой емкости), Q1 2016 Edition, February 2016.
- [9] **Eggertsson T.** Economic behavior and institutions (Экономическое поведение и институты). Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [10] **Ноздрин В.В.** Техничко-экономический анализ использования радиочастотного спектра в Российской Федерации // Электросвязь. 2016. № 6.
- [11] ECC Report 192. The current status of Dynamic Frequency Selection in the 5 GHz frequency range (Статус развития систем динамического выбора частоты в диапазоне 5 ГГц). 2014.
- [12] **Ноздрин В.В.** Современные методы управления использованием РЧС // Мобильные системы. 2007. № 3. С. 23–26.
- [13] **Rawls J.** Theory of Justice (Теория справедливости). Harward University Press Cambridge, 1971
- [14] **Ostrom E.** The Evolution of Institutions for Collective Action (Эволюция институтов совместных действий). Cambridge University Press. 1990.
- [15] Report ITU-R SM.2404-0. Regulatory tools to support enhanced shared use of the spectrum. (Регуляторные меры направленные на усиление совместного использования РЧС). 2017.
- [16] Report ITU-R M.2417. Technical and operational characteristics of land-mobile service applications in the frequency range 275-450 GHz (Технические и эксплуатационные характеристики наземных подвижных применений в диапазоне 275-450 ГГц). 2017.
- [17] Report ITU-R F.2416. Technical and operational characteristics and applications of the point-to-point fixed service applications operating in the frequency band

275-450 GHz (Технические и эксплуатационные характеристики наземных фиксированных применений в диапазоне 275-450 ГГц). 2017.

[18] **Mamchenkov P.** Towards spectrum efficiency through spectrum re-allocation (К эффективности использования спектра за счет его перераспределения). ITU Workshop on Spectrum Management: Economic Aspects Bangkok, Thailand 3–4 May 2017.

[19] ITU Global E-waste Monitor (Контроль электронного мусора), 2017.

[20] ITU-T Resolution 200. Connect 2020. Agenda for global Telecommunication development (Повестка для глобального развития электросвязи). Busan, 2014.

[21] Space Sustainability (Устойчивое использование космического пространства). Secure World Foundation. 2017.

[22] **Henry C.** LEO and MEO broadband constellations mega source of consternation. Space News, March, 2018

[23] ITU-R Report SA.2312 Characteristics, definitions and spectrum requirements of nanosatellites and picosatellites, as well as systems composed of such satellites (Характеристики, определение и потребности использования спектра для нано и пико спутников, а также систем, основанных на таких спутниках). 2017.

[24] **Makarov V.V., Nozdrin V.V.** Economic methods of spectrum/orbit management for satellite networks (Экономические методы управления орбитально-частотным ресурсом для спутниковых систем) // Siberian Journal of Science and Technology. 2018. Vol. 19, no. 1. P. 173–181.

**НОЗДРИН Вадим Виктрович.** E-mail: vadim.nozdrin@itu.int

**МАКАРОВ Владимир Васильевич.** E-mail: akad.makarov@mail.ru

*Статья поступила в редакцию: 10.09.2018*

## REFERENCES

[1] **A.L. Alekseyev, T.A. Blatova, V.V. Makarov, N.S. Shuval-Sergeyeva,** Innovatsionnyye biznes-modeli v tsifrovoy ekonomike i ikh konkurentnyye preimushchestva, Voprosy radioelektroniki, 9 (2018) 100–104.

[2] Report ITU-R M.2228-1. Advanced intelligent transport systems (ITS) radiocommunications (Sovremennaya intellektualnaya transportnaya sistema). 2015.

[3] Report ITU-R RS.2178. The essential role and global importance of radio spectrum use for Earth observations and for related applications (Sushchestvennaya rol i globalnaya vazhnost ispolzovaniya radiochastotnogo spektra dlya nablyudeniya Zemli i sopotstvuyushchikh primeneniya). 2010.

[4] **Ye.N. Rozenberg, A.A. Abramov, V.V. Batrayev,** Integralnoye regulirovaniye dvizheniya poyezdov, Zheleznodorozhnyy transport, 9 (2017).

[5] **H.P. Schwarz,** Precise positioning technology in agriculture and forestry (Tekhnologii tochnogo pozitsionirovaniya v selskom i lesnom khozyaystve). Munich Satellite Navigation Summit Proceedings. 2016.

[6] Report ITU-R M.2370. IMT Traffic estimates for the years 2020 to 2030 (Raschet trafika v sistemakh IMT v period s 2020 do 2030 gody). 2015.

[7] **P. Nava,** IMT Backhaul (Opornyye seti dlya IMT). ITU/SPBPU Seminar for CIS and Europe. St. Petersburg, Russia, 2018.

[8] Satellite Capacity Pricing Index (Indekh platy za arendu sputnikovoy yemkosti), Q1 2016 Edition, February 2016.

[9] **T. Eggertsson,** Economic behavior and institutions (Ekonomicheskoye povedeniye i instituty). Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

[10] **V.V. Nozdrin,** Tekhniko-ekonomicheskyy analiz ispolzovaniya radiochastotnogo spektra v Rossiyskoy Federatsii, Elektrosvyaz, 6 (2016).

[11] ECC Report 192. The current status of Dynamic Frequency Selection in the 5 GHz frequency range (Status razvitiya sistem dinamicheskogo vybora chastoty v diapazone 5 GGts). 2014.

[12] **V.V. Nozdrin,** Sovremennyye metody upravleniya ispolzovaniyem RChS, Mobilnye sistemy, 3 (2007) 23–26.

[13] **J. Rawls,** Theory of Justice (Teoriya spravedlivosti). Harvard University Press Cambridge, 1971.

[14] **E. Ostrom,** The Evolution of Institutions for Collective Action (Evolutsiya institutov sovmestnykh deystviy). Cambridge University Press. 1990.

[15] Report ITU-R SM.2404-0. Regulatory tools to support enhanced shared use of the spectrum. (Regulyatornyye mery napravlenyye na usileniye sovmestnogo ispolzovaniya RChS). 2017.

[16] Report ITU-R M.2417. Technical and operational characteristics of land-mobile service applications in the frequency range 275-450 GHz (Tekhnicheskiye i ekspluatatsionnyye kharakteristiki nazemnykh podvizhnykh primeneniya v diapazone 275–450 GGts). 2017.

[17] Report ITU-R F.2416. Technical and operational characteristics and applications of the point-to-point fixed service applications operating in the frequency band

275-450 GHz (Tekhnicheskiye i ekspluatatsionnyye kharakteristiki nazemnykh fiksirovannykh primeneniye v diapazone 275–450 GGts). 2017.

[18] **P. Mamchenkov**, Towards spectrum efficiency through spectrum re-allocation (K effektivnosti ispolzovaniya spektra za schet yego pereraspredeleniya). ITU Workshop on Spectrum Management: Economic Aspects Bangkok, Thailand 3–4 May 2017.

[19] ITU Global E-waste Monitor (Kontrol elektronnoy musora), 2017.

[20] ITU-T Resolution 200. Connect 2020. Agenda for global Telecommunication development (Povestka dlya globalnogo razvitiya elektrosvyazi). Busan, 2014.

[21] Space Sustainability (Ustoychivoe ispolzovanie kosmicheskogo prostranstva). Secure World Foundation. 2017.

[22] **C. Henry**, LEO and MEO broadband constellations mega source of consternation. Space News, March, 2018.

[23] ITU-R Report SA.2312 Characteristics, definitions and spectrum requirements of nanosatellites and picosatellites, as well as systems composed of such satellites (Kharakteristiki, opredeleniye i potrebnosti ispolzovaniya spektra dlya nano i piko sputnikov, a takzhe sistem, osnovannykh na takikh sputnikakh). 2017.

[24] **V.V. Makarov, V.V. Nozdrin**, Economic methods of spectrum/orbit management for satellite networks (Ekonomicheskiye metody upravleniya orbitalno-chastotnym resursov dlya sputnikovykh sistem), Siberian Journal of Science and Technology, 19 (1) (2018) 173–181.

**NOZDRIN Vadim V.** E-mail: vadim.nozdrin@itu.int

**MAKAROV Vladimir V.** E-mail: akad.makarov@mail.ru