

Научная статья
УДК 621.371.32
<https://doi.org/10.24143/2072-9502-2026-3-68-74>
EDN OEWOGL

Упрощенная модель расчета для проектирования скорости передачи данных в системах мобильной связи 4-го поколения (LTE)

Олег Николаевич Пищин

*Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Россия, o.pishin@yandex.ru*

Аннотация. Острая необходимость получения проектных данных о возможной скорости передачи данных в системах радиосвязи на базе стандарта LTE обусловила задачи исследования. Рассмотрены все показатели сети мобильной связи, оказывающие воздействие на формирование характеристик пропускной способности технологии. Предлагается использовать модель расчета скорости передачи данных для стандарта LTE. Основными параметрами сети, влияющими на скорость передачи данных, являются отношение сигнала к помехе (или к шуму) и ширина канала, используемого системой мобильной связи. В системе расчетов скорости передачи данных не используются данные о загрузке сети и дальности местонахождения абонентской радиостанции, как не оказывающие прямого воздействия на предоставляемую системой связи скорость передачи данных. Кроме ширины используемого канала, в системе LTE на скорость передачи данных оказывают влияние виды модуляции. В системе мобильной связи LTE используются квадратурно-фазовая (QPSK, Quadrature Phase Shift Keying) и 3 версии квадратурно-амплитудной модуляции (QAM, Quadrature Amplitude Modulation). Переключение этих видов модуляции происходит автоматически базовой станцией в зависимости от условий передачи и приема радиосигналов или отношения полезного сигнала к мешающему (отношения сигнала к помехе). Дистанция связи не является критерием в определении скорости передачи данных, как и абонентская нагрузка сети. Доступная для абонента скорость передачи данных будет снижаться, если количество пользователей системы будет увеличиваться, однако общая скорость передачи данных (емкость предоставляемой услуги) остается неизменной, а значит скорость передачи данных, предоставляемая оператором, постоянна вне зависимости от подключившихся пользователей. Разработанное математическое выражение расчета позволяет получить точные данные минимальной и максимально возможной скорости передачи данных для любого локального участка проектирования сети сотовой связи LTE.

Ключевые слова: модель расчета, скорость передачи данных, виды модуляции LTE, ширина канала, отношение сигнала к помехе, количество ресурсных блоков, количество бит

Для цитирования: Пищин О. Н. Упрощенная модель расчета для проектирования скорости передачи данных в системах мобильной связи 4-го поколения (LTE) // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2026. № 3. С. 68–74. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2026-3-68-74>. EDN OEWOGL.

Original article

Simplified calculation model for designing data transfer rates in 4th generation (LTE) mobile communication systems

Oleg N. Pishchin

*Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russia, o.pishin@yandex.ru*

Abstract. The urgent need to obtain design data on the possible data transfer rate in LTE-based radio communication systems has led to research objectives. All indicators of the mobile communication network that influence the for-

mation of the characteristics of the technology bandwidth are considered. It is proposed to use a data transfer rate calculation model for the LTE standard. The main network parameters that affect the data transfer rate are the signal-to-noise ratio and the width of the channel used by the mobile communication system. The data transfer rate calculation system does not use data on network load and the location range of the subscriber radio station, as they do not have a direct impact on the data transfer rate provided by the communication system. In addition to the width of the channel used, in an LTE system, the data transfer rate is influenced by the types of modulation. The LTE mobile communication system uses quadrature phase (QPSK, Quadrature Phase Shift Keying) and 3 versions of quadrature amplitude modulation (QAM, Quadrature Amplitude Modulation). Switching of these types of modulation occurs automatically by the base station, depending on the conditions of transmission and reception of radio signals or the ratio of the useful signal to the interfering one (signal to interference ratio). The communication distance is not a criterion in determining the data transfer rate, as well as the subscriber load of the network. The data transfer rate available to the subscriber will decrease if the number of system users increases, but the total data transfer rate (capacity of the service) remains unchanged, which means that the data transfer rate provided by the operator is constant regardless of the number of connected users. The developed mathematical expression for calculation allows for obtaining accurate data on the minimum and maximum possible data transfer rates for any local area of the LTE cellular network design.

Keywords: calculation model, data transfer rate, types of LTE modulation, channel width, signal-to-power ratio, number of resource blocks, number of bits

For citation: Pishchin O. N. Simplified calculation model for designing data transfer rates in 4th generation (LTE) mobile communication systems. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer science and informatics.* 2026;3:68-74. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2026-3-68-74>. EDN OEWOGL.

Введение

В настоящее время продолжается расширение и оптимизация сетей сотовой связи стандарта LTE (Long-Term Evolution, долгосрочное развитие) – стандарта высокоскоростной передачи данных (обозначается как 4G LTE). Загруженность сети LTE и ее повсеместное использование продемонстрировали высокую востребованность этого стандарта в обществе. Более того, Государственной комиссией по радиочастотам РФ принято решение о регламентации выделения полосы радиочастот 800 МГц для использования радиоэлектронными средствами в сетях стандарта LTE и последующих его модификаций [1]. Таким образом, для развития сетей сотовой связи 4-го поколения выделена еще одна дополнительная полоса частот, что подтверждает государственную заинтересованность в развитии обозначенной технологии. Однако при этом операторам поставлены условия, означающие необходимость развития услуг в рекреационных зонах (зонах, удаленных от центров инфокоммуникационных услуг), что означает расширение сети LTE в населенных пунктах с населением от 1 000 человек, а также обеспечение сплошного покрытия услугой предоставления высокоскоростного интернета федеральных автомобильных дорог.

Таким образом, многозадачность и объемы проектирования в системах связи для стандарта LTE только увеличиваются. При проектировании систем сотовой связи, помимо показателей дистанции радиосвязи или зоны доступа в радиосеть, необходим конкретный результат уровня предоставляемых услуг системой. Абонентов всегда интересует, какая скорость передачи данных будет предоставлена, т. к. заявленные технологические возможности системы 4-го поколения LTE высоки,

но далеко не всегда достижимы на практике по ряду объективных причин. В современной методической и учебной литературе [2–4] подробно описываются процесс функционирования системы связи на базе стандарта LTE, структура системы и алгоритмы функционирования, однако нет доступного расчета, который, учитывая все объективные факторы, влияющие на скорость передачи данных, позволит представить границы возможного для технологии LTE, исходя из известных при проектировании условий. Отсутствие модели расчета не позволяет воспроизвести точную картину при проектировании для принятия решения как операторам, организующим связь, на целесообразность создания сети связи, так и абонентам – как частным лицам, так и корпоративным клиентам, – на каких условиях им предлагается заключить договор.

Еще более важным представляется вопрос о необходимости такого рода модели расчета в системе образования для подготовки инженеров-проектировщиков по профилю «Системы мобильной связи».

Таким образом, необходима упрощенная модель расчета, которая позволяет, оценив возможности сети передачи по исходным данным проектируемой сети стандарта LTE, рассчитать максимальную и минимальную скорость передачи данных для локального участка сети проектирования.

Параметры, влияющие на скорость передачи данных в LTE

В исследуемой сети LTE скорость передачи данных не является величиной постоянной, однако для оценки конкурентоспособности проекта необходимо рассчитать возможности системы по качеству предоставляемых услуг. Для системы LTE

первым параметром оценки качества является, безусловно, скорость передачи данных.

LTE позволяет расширить скоростные характеристики системы за счет использования технологии MIMO (Multiple Input Multiple Output, метод пространственного кодирования сигнала), позволяющей увеличить полосу пропускания канала [5]. Однако это приводит к усложнению антенных систем, кроме того, технология MIMO повсеместно пока не используется из-за недостаточных возможностей бюджетного абонентского оборудова-

ния. Поэтому будет проведено исследование параметров сети, влияющих на скорость передачи данных LTE вне зависимости от применения технологии MIMO.

Безусловными параметрами, влияющими на скорость передачи данных, являются ширина канала и отношение сигнала к помехе (или к шуму).

Основной качественной характеристикой, отражающей возможности сети LTE, является ширина используемого канала, в сети 4G применяются полосы частот с различной шириной (табл. 1).

Таблица 1
Table 1

Соответствие ширины канала количеству ресурсных блоков в системе LTE*
Matching the channel width to the number of resource blocks in the LTE system

Параметр	Значение					
Ширина канала, МГц	1,4	3	5	10	15	20
Количество ресурсных блоков	6	15	25	50	75	100

* Составлено по [6].

Логично полагать, что чем больше ширина канала, тем больше будет пропускная способность системы, выражаемая в скорости передачи данных. Самая высокая скорость передачи данных возможна при максимальной ширине канала в 20 МГц (см. табл. 1), однако дистанция связи на штатной частоте 2 600 МГц при использовании технологии LTE невелика и составляет около 800 м при наличии прямой видимости. Чтобы увеличить дальность связи, операторы используют рефарминг, т. е. используют для организации передачи данных LTE низкочастотные диапазоны других технологий сотовой связи.

Применение рефарминга стало возможным в связи с разрешением применения принципа технологической нейтральности, позволяющей операторам использовать частотные диапазоны систем второго поколения (GSM на частотах 1 800 и 900 МГц), а также систем третьего поколения (WCDMA на частотах 2 100 МГц), на которые у них имеются действующие лицензии, в интересах технологии LTE. Однако в имеющихся у оператора сотовой связи частотных диапазонах выделить ширину канала в 20 МГц для организации максимальных возможностей технологии представляется не всегда возможным. Так, в системе GSM900 имеется всего 124 частотных канала на всех четырех операторов, действующих, как правило, на одной территории. Из шага сетки частот в GSM, равной 200 КГц, следует, что при использовании предельного рефарминга каждому оператору доступна полоса в диапазоне

5–6 МГц. Полное использование диапазона GSM в интересах передачи данных невозможно, т. к. часть диапазона необходимо выделить для предоставления голосовых услуг в системе связи. Если часть услуг необходимо оставить для голосовой связи, диапазон сужается примерно вдвое и максимально заявленные характеристики LTE становятся недостижимы. Значительно большую полосу частот можно использовать на частотах в диапазоне 1 800 МГц (DCS-1800) – до 20 МГц, что позволит значительно увеличить скорость передачи данных в указанном диапазоне.

Таким образом, ширина используемого канала для оператора сотовой связи обеспечивает конкурентное преимущество, т. к. является основным фактором пропускной способности системы мобильной связи и скорости передачи данных.

Следующей составляющей, определяющей скорость передачи данных, является отношение сигнала к помехе.

Скорость передачи данных в системах мобильной связи по технологии LTE зависит от типа применяемой модуляции. В LTE используются следующие модуляции:

- квадратурная фазовая модуляция QPSK;
- квадратурная амплитудная модуляция 16QAM;
- квадратурная амплитудная модуляция 64QAM;
- квадратурная амплитудная модуляция 256QAM.

Все эти виды модуляции позволяют передавать разное количество информации (количество бит в каждом символе) (табл. 2).

Таблица 2

Table 2

Зависимость количества передаваемых бит в символе от модуляции LTE

Dependence of the number of transmitted bits in a symbol on LTE modulation

Модуляция	QPSK	16QAM	64QAM	256QAM
Количество бит в символе	2	4	6	8

Чем выше порядок модуляции, тем выше требования к качеству канала радиосвязи для реализации той или иной модуляции.

Для возможности восстановления потерянных бит информации в LTE функционирует система коррекции ошибок методом упреждения (Forward Error Correction, FEC, или Channel Coding), который заключается в том, что к информационным битам должны быть добавлены контрольные биты, по ним, в случае утраты информации, можно восстановить точную копию переданной информации. Чем ниже соотношение сигнала к шуму, тем больше контрольных бит необходимо добавлять в сообщение при передаче.

В LTE применяются следующие коэффициенты кодирования транслируемой информации: 1/8, 1/5, 1/4, 1/3, 3/4, 4/5. Эти отношения показывают зависимость количества контрольных бит от информационных: в числителе указывается количество информационных бит, а в знаменателе общее количество передаваемых бит. Таким образом, коэффициент кодирования 1/8 означает передачу на каждый информационный бит еще семи контрольных или проверочно-восстановительных [7].

Для каждого значения скорости кода (табл. 3) существует требуемое значение отношения сигнала к шуму.

Таблица 3

Table 3

Соответствие индикатора качества скорости кода в системе LTE

Compliance of the code speed quality indicator in the LTE system

Индикатор качества канала	Вид модуляции	Скорость кода
1	QPSK	0,8
2		0,19
3		0,43
4		0,37
5	16QAM	0,48
6		0,6
7		0,46
8		0,55
9	64QAM	0,66
10		0,75
11		0,82
12		0,7
13	256QAM	0,78
14		0,86
15		0,92

Чем выше порядок (вид) модуляции (см. табл. 3) и чем меньше добавляется контрольно-проверочных бит, тем больше в потоке данных передается полезной информации и меньше контрольно-проверочной. Соответственно, чем больше отношение уровня основного сигнала к помехе (SNR, Signal-to-Noise Ratio), тем более высокие скорости передачи возможны.

Базовая станция выбирает кодово-модуляционную схему в зависимости от отношения сигнала к помехе. Чем выше кодово-модуляционная схема,

тем больше полезных данных (бит) может быть передано в единицу времени.

Абонентская радиостанция передает измерения качества канала на базовую станцию (БС), а БС подключает кодово-модуляционную схему для передачи (см. табл. 3).

Информация для пересчета индикации качества канала в номер модуляционно-кодовой схемы из табл. 3 задается производителем оборудования и является закрытой. Более того, у каждого производителя базовых станций схема может быть близ-

кой, но не одинаковой. В таком случае задача получения проектных данных скорости передачи данных сводится (независимо от закрытой информации) к определению максимальной и минимальной скорости передачи данных, предполагаая наилучшие и наихудшие радиоусловия (SNR).

Для расчета пропускной способности базовой станции в LTE-сети необходимо ознакомиться со структурой организации данных, которые во временной области организованы в 10-миллисекундные радиочасти. Каждая ячейка состоит из 10 1-миллисекундных подчастот, а они, в свою очередь, состоят из двух слотов по 0,5 мс [8]. В частотной области данные сгруппированы по 12 поднесущих частот, каждая из которых имеет диапазон в 15 кГц, что дает в сумме 180 кГц на группу. Группа из 12

поднесущих частот продолжительностью в 1 слот называется ресурсным блоком.

Наименьшая ресурсная единица в LTE представляет собой одну поднесущую частоту продолжительностью в один слот и именуется ресурсным элементом. В зависимости от типа защитного интервала – нормальный или расширенный – один ресурсный блок состоит из 84 (расширенный) или 72 (нормальный) ресурсных элементов.

Один ресурсный элемент в зависимости от модуляции содержит 2 или более бита (см. табл. 2).

Для упрощения процесса оценки возможностей системы LTE (используя предварительные расчеты) возможно использовать данные табл. 4, где для различных модуляций рассчитана скорость при коэффициенте кодирования 4/5.

Таблица 4

Table 4

Таблица максимальной скорости передачи данных, Мбит/с, в канале LTE для коэффициента кодирования 4/5

Table of the maximum data transfer rate, Mbit/s, in the LTE channel for the 4/5 encoding coefficient

Модуляция	Количество ресурсных блоков					
	6	15	25	50	75	100
QPSK	0,936	2,344	4,008	7,992	11,832	15,84
16QAM	1,8	4,584	7,736	15,264	22,92	30,576
64QAM	4,392	11,064	18,336	36,696	55,056	75,376
256QAM	5,992	14,688	24,496	48,936	75,376	97,896

Полученные данные скорости передачи информации могут быть актуальны только в случае активности в сети на один передатчик не более одного абонента. В случае увеличения количества абонентов на локальном исследуемом участке местности скорость передачи данных будет снижаться пропорционально количеству абонентов.

Для формализации решения задач расчета необходимо ввести все действующие переменные для проведения проектирования скорости передачи данных в системе LTE, т. е. обозначить параметры оборудования, влияющие на скорость передачи данных. Из вышесказанного следует, что основой пропускной способности системы является ширина полосы частот (см. табл. 1), от которой зависит количество используемых системой ресурсных блоков. Обозначим его переменной W .

На скорость передачи данных влияет вид используемой модуляции (см. табл. 2), от которой зависит количество бит в ресурсном элементе (переменная X). Значительные корректировки в результат итоговой скорости передачи данных вносит степень кодирования (переменная Z ; варианты значений, которые может принимать переменная: 1/8, 1/5, 1/4, 1/3, 1/2, 2/3, 3/4, 4/5).

На объем передаваемой информации влияет количество ресурсных элементов: 72 или 84 вместе

с опорными, не несущими информацию. Учитывая, что количество опорных элементов составляет 12, 24, ресурсных элементов (переменная Y), используемых для передачи данных, только 60. Таким образом, переменная Y может быть константой для текущих систем модуляции LTE. Для расчета скорости передачи данных значимым параметром является продолжительность ресурсного элемента (переменная T). Значение этого критерия – 0,5 мс – фиксируется нормативными документами [8].

Таким образом, для расчета скорости передачи данных в системе LTE предлагается использовать следующее выражение:

$$V_{\text{пд}} = \frac{W \cdot X \cdot Z \cdot Y}{T}, \quad (1)$$

где $V_{\text{пд}}$ – скорость передачи данных; W – количество ресурсных блоков; X – количество бит в ресурсном элементе; Z – степень кодирования; Y – количество ресурсных элементов; T – продолжительность ресурсного элемента.

Модель (1) будем считать упрощенной, т. к. она учитывает лишь характеристики основных параметров сети мобильной связи, и такая цель моделирования, как получение расчетных данных максимально и минимально возможной скорости пе-

передачи данных при заданных условиях мобильной сети, может считаться достигнутой.

Полученная математическая модель максимально полно дает представление о проектировании возможной скорости передачи данных в системе LTE. Учтены основные параметры, влияющие на формирование скорости передачи данных в системе сотовой связи стандарта 4-го поколения (LTE). Необходимо обратить внимание на то, что повсеместное мнение о зависимости скорости передачи данных в LTE от дистанции связи не является верным. Как видно из переменных модели, в ней нет учета расстояния до абонента или дистанции связи. Косвенно эта зависимость может проследиваться, однако в местности со сложным рельефом или городской местности зоны с определенным уровнем отношения сигнала к помехе могут перемежаться. Это значит, что на более высокой дальности расположения абонента от базовой станции скорость передачи данных может быть выше, чем на более близком расстоянии абонента БС, т. е. критерий отношения сигнала к помехе из-за быстрых замираний в сети сотовой связи изменяется неравномерно, следовательно, режимы модуляции

будут переключаться в соответствии с реальными радиоусловиями (наличием или отсутствием помех). Более того, в соответствии с правилами применения базовых станций и ретрансляторов сетей подвижной радиотелефонной связи стандарта LTE и его модификации [9] чувствительность приемного оборудования для различной ширины используемого канала отличается [10], например, для ширины канала 1,4 МГц значение составляет 106,8 дБм, а для ширины канала от 5 до 20 МГц – только 101,5 дБм, т. е. именно ширина полосы канала и режимы работы оборудования, переключаемые зависимостью уровня сигнала к уровню помехи, влияют на изменение скорости передачи данных.

Заключение

Разработана модель расчета скорости передачи данных для проведения предварительного проектирования в системах подвижной радиосвязи при использовании технологии LTE. Использование модели позволит оценить возможности проектируемой сети по скорости передачи данных для принятия решения операторами о целесообразности реализации проекта сети связи.

Список источников

1. О выделении полос радиочастот, внесении изменений в решения ГКРЧ и продлении срока действия решений ГКРЧ: решение ГКРЧ при Минкомсвязи России от 16 апреля 2018 г. № 18-45-05-2 (с изм. на 16 июня 2021 г.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/557266523?ysclid=mknswt6ilfl51429761> (дата обращения: 21.01.2026).
2. Буснюк Н. Н., Мельянец Г. И. Системы мобильной связи: учеб.-метод. пособие. Минск: Изд-во БГТУ, 2018. 153 с.
3. Билятинов К. З., Арсеньева А. З., Меняйло В. В., Ивановский С. В. Основы построения и функционирования мобильных систем передачи данных: учеб. пособие. СПб.: Изд-во ИТМО, 2023. 157 с.
4. Лохвицкий М. С., Сорокин А. С., Шорин О. А. Мобильная связь, стандарты, структуры, алгоритмы, планирование. М.: Горячая линия – Телеком, 2018. 264 с.
5. Дюсенова О. С., Пищин О. Н., Павленко Г. С. Исследование использования новых стандартов сотовой связи и широкополосного доступа LTE и WIGIG для предоставления услуг Triple Play // Молодой ученый. 2013. № 5 (52). С. 45–49.
6. ETSI TS 102 250-5 V1.2.1 (2005-05) Technical "Specification Speech Processing, Transmission and Quality Aspects (STQ); QoS aspects for popular services in GSM and 3G networks; Part 5: Definition of typical measurement

- profiles". European Telecommunications Standards Institute, 2005. 19 p. URL: https://archive.org/details/etsi_ts_102_250-5_v01.02.01 (дата обращения: 02.02.2026).
7. Красилов А. Н., Шахнович И. В. Технология сотовой связи LTE – почти 4G // Электроника. 2009. № 1. С. 62–72.
8. 3GPP TS 36 104 "E-UTRA Base Station (BS) radio transmission and reception" (Release 9). April 2011. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136100_136199/136104/15.07.00_60/ts_136104v150700p.pdf (дата обращения: 02.02.2026).
9. Об утверждении Правил применения базовых станций и ретрансляторов сетей подвижной радиотелефонной связи. Часть VI. Правила применения базовых станций и ретрансляторов сетей подвижной радиотелефонной связи стандарта LTE и его модификации LTE-Advanced: приказ Минкомсвязи России от 29 октября 2018 г. № 572. URL: https://r-tel.ru/sitetemp/files/documents/regulations/572_29-10-2018.pdf (дата обращения: 02.02.2026).
10. Пищин О., Оборотов М. Повышение качества обслуживания абонентов мобильной связи на железнодорожных магистралях в Астраханской области // Системная инженерия и инфокоммуникации. 2025. № 2. С. 27–31.

References

1. *O vydelenii polos radiochastot, vnesenii izmenenij v resheniya GKRC i prodlenii sroka dejstviya reshenij GKRC: reshenie GKRC pri Minkomsvyazi Rossii ot 16 aprelya 2018 g. № 18-45-05-2 (s izmeneniyami na 16 iyunya 2021 g.)* [On the allocation of radio frequency bands, amendments to the decisions of the SCRF and the

- extension of the validity of the decisions of the SCRF: decision of the SCRF under the Ministry of Communications of the Russian Federation dated April 16, 2018 No. 18-45-05-2 (as amended on June 16, 2021)]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/557266523?ysclid=mknswt6ilfl51429761> (accessed: 21.01.2026).

2. Busnyuk N. N., Mel'yanec G. I. *Sistemy mobil'noj svyazi: uchebno-metodicheskoe posobie* [Mobile communication systems: a teaching aid]. Minsk, Izd-vo BGTU, 2018. 153 p.
3. Bilyatdinov K. Z., Arsen'eva A. Z., Menyajlo V. V., Ivanovskij S. V. *Osnovy postroeniya i funkcionirovaniya mobil'nyh sistem peredachi dannyh: uchebnoe posobie* [Fundamentals of the construction and functioning of mobile data transmission systems: a textbook]. Saint Petersburg, Izd-vo ITMO, 2023. 157 p.
4. Lohvickij M. S., Sorokin A. S., Shorin O. A. *Mobil'naya svyaz', standarty, struktury, algoritmy, planirovanie* [Mobile communications, standards, structures, algorithms, planning]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2018. 264 p.
5. Dyusenova O. S., Pishchin O. N., Pavlenko G. S. *Issledovanie ispol'zovaniya novyh standartov sotoj svyazi i shirokopolosnogo dostupa LTE i WIGIG dlya predostavleniya uslug Triple Play* [Research on the use of new LTE and WIGIG cellular and broadband standards to provide Triple Play services]. *Molodoj uchenyj*, 2013, no. 5 (52), pp. 45-49.
6. ETSI TS 102 250-5 V1.2.1 (2005-05) *Technical "Specification Speech Processing, Transmission and Quality Aspects (STQ); QoS aspects for popular services in GSM and 3G networks; Part 5: Definition of typical measurement profiles"*. European Telecommunications Standards Institute, 2005. 19 p. Available at https://archive.org/details/etsi_ts_102_250-5_v01.02.01 (accessed: 02.02.2026).
7. Krasilov A. N., Shahnovich I. V. *Tekhnologiya sotoj svyazi LTE – pocht 4G* [LTE cellular technology – almost 4G]. *Elektronika*, 2009, no. 1, pp. 62-72.
8. 3GPP TS 36 104 "E-UTRA Base Station (BS) radio transmission and reception" (Release 9). April 2011. Available at: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136100_136199/136104/15.07.00_60/ts_136104v150700p.pdf (accessed: 02.02.2026).
9. *Ob utverzhdenii Pravil primeneniya bazovyh stancij i retranslyatorov setej podvizhnoj radiotelefonnoj svyazi. Chast' VI. Pravila primeneniya bazovyh stancij i retranslyatorov setej podvizhnoj radiotelefonnoj svyazi standarta LTE i ego modifikacii LTE-Advanced: prikaz Ministerstva cifrovogo razvitiya, svyazi i massovyh kommunikacij RF ot 29 oktyabrya 2018 g. № 572* [On approval of the Rules for the Use of base stations and repeaters of mobile radiotelephone communication networks. Part VI. Rules for the Use of base stations and Repeaters of LTE mobile Radiotelephone Networks and its LTE-Advanced modification: Order No. 572 of the Ministry of Digital Development, Communications and Mass Communications of the Russian Federation dated October 29, 2018]. Available at: https://r-tel.ru/sitetemp/files/documents/regulations/572_29-10-2018.pdf (accessed: 02.02.2026).
10. Pishchin O., Oborotov M. *Povyshenie kachestva obsluzhivaniya abonentov mobil'noj svyazi na zheleznodorozhnyh magistralyah v Astrahanskoj oblasti* [Improving the quality of service for mobile subscribers on railway lines in the Astrakhan region]. *Sistemnaya inzheneriya i infokommunikacii*, 2025, no. 2, pp. 27-31.

Статья поступила в редакцию 16.02.2026; одобрена после рецензирования 18.04.2026; принята к публикации 01.07.2026
The article was submitted 16.02.2026; approved after reviewing 18.04.2026; accepted for publication 01.07.2026

Информация об авторе / Information about the author

Олег Николаевич Пищин – кандидат технических наук, доцент; заведующий кафедрой связи; Астраханский государственный технический университет; o.pishin@yandex.ru

Oleg N. Pishchin – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Head of the Department of Communication; Astrakhan State Technical University; o.pishin@yandex.ru

