



Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2023. Т. 31, № 5
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2023;31(5)

Краткое сообщение
УДК 530.182

DOI: 10.18500/0869-6632-003060
EDN: WGHKJW

Разметка стадий быстрого и медленного сна с помощью рекуррентного анализа

Е. П. Емельянова✉, А. О. Сельский

Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия
E-mail: ✉meretari@yandex.ru, selskiiao@gmail.com

Поступила в редакцию 10.05.2023, принята к публикации 13.07.2023,
опубликована онлайн 15.09.2023, опубликована 29.09.2023

Аннотация. Цель настоящего исследования — разработать простую методику разметки стадий сна по данным ЭЭГ, полученным из полисомнографических записей. Для проверки работы метода он применен к трем группам испытуемых: условно здоровым, пациентам с болезнью Паркинсона, пациентам с апноэ. **Методы.** Для распознавания стадий сна используется расчет рекуррентного показателя и его последующая оценка. Показано, что стадии быстрого и медленного сна демонстрируют различные значения рекуррентного показателя. **Результаты.** В зависимости от того, в какой диапазон попадает рекуррентный показатель, определялись стадии быстрого и медленного сна для испытуемых по их ночным полисомнографическим записям. Для трех групп испытуемых были рассчитаны средние значения точности метода, которые в среднем превышают 72.5%. **Заключение.** Показано, что на основе рекуррентного анализа возможно создать простой и эффективный метод распознавания стадий сна. Для пациентов с апноэ среднее значение точности метода выше, чем для условно здоровых испытуемых, для которых, в свою очередь, это значение было выше, чем для пациентов с болезнью Паркинсона. Это можно объяснить тем, что изменчивость статистических характеристик рекуррентного показателя по стадиям сна в группе у пациентов с апноэ ниже, а у пациентов с болезнью Паркинсона выше по сравнению с условно здоровыми испытуемыми.

Ключевые слова: рекуррентный анализ, полисомнография, электроэнцефалография, стадии сна, автоматическая разметка.

Благодарности. Работа поддержана Российским научным фондом, проект No 22-72-10061.

Для цитирования: Емельянова Е. П., Сельский А. О. Разметка стадий быстрого и медленного сна с помощью рекуррентного анализа // Известия вузов. ПНД. 2023. Т. 31, № 5. С. 643–649. DOI: 10.18500/0869-6632-003060. EDN: WGHKJW

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Marking stages of REM and non-REM sleep using recurrent analysis

E. P. Emelyanova✉, *A. O. Selskii*

Saratov State University, Russia

E-mail: ✉meretari@yandex.ru, selskii@yandex.ru

Received 10.05.2023, accepted 13.07.2023, available online 15.09.2023, published 29.09.2023

Abstract. The purpose of this study — to develop a simple technique for labeling sleep stages according to EEG data obtained from half-somnography recordings. To test the work of the method, it will be applied to three groups of subjects: conditionally healthy, patients with Parkinson's disease, patients with sleep apnea. **Methods.** In this work, to recognize sleep stages, we use the calculation of a recurrent indicator and its subsequent assessment. It is shown that the stages of REM (Rapid Eye Movement) and non-REM sleep demonstrate different values of the recurrent index. **Results.** Depending on the range in which the recurrent indicator falls, the stages of REM and non-REM sleep were determined for the subjects, according to their nightly polysomnographic records. For three groups of subjects, the average knowledge of the accuracy of the method was calculated, which for all groups exceeded 72.5%. **Conclusion.** It is shown that on the basis of recurrent analysis it is possible to create a simple and effective method for recognizing sleep stages. For patients with apnea, the average accuracy of the method is higher than for apparently healthy subjects, for whom, in turn, this value was higher than for patients with Parkinson's disease. This can be explained by the fact that the variability in the group of statistical characteristics of sleep stages in patients with apnea is lower, and in patients with Parkinson's disease is higher, compared with apparently healthy subjects.

Keywords: recurrent analysis, polysomnography, electroencephalography, sleep stages, automatic markup.

Acknowledgements. The work was supported by the Russian Science Foundation, project No. 22-72-10061.

For citation: Emelyanova EP, Selskii AO. Marking stages of REM and non-REM sleep using recurrent analysis. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics.* 2023;31(5):643–649. DOI: 10.18500/0869-6632-003060

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Введение

В данной работе представлен метод автоматической разметки стадий сна с помощью расчета рекуррентных показателей и их последующего анализа. Проблема автоматизации разметки сна на данный момент остро стоит для специалистов-сомнологов [1]. Из-за большого объема данных эта задача является нетривиальной, особенно с учетом того, что полисомнографические записи делаются обычно две ночи подряд и необходимо проанализировать обе записи [2]. В связи с этим рекуррентный анализ представляется хорошим методом для разметки данных, так как сам метод прост в реализации и не требует большого числа сложных вычислений [3]. Далее, если метод покажет хорошую точность и низкие затраты машинного времени, можно использовать его для быстрой обработки данных ночного сна и выделения стадий сна в реальном времени.

В основе метода лежит расчет рекуррентных показателей в небольших временных окнах. По динамике рекуррентного показателя можно определить стадии наиболее медленного сна и быстрого сна, позволяя записать гипнограмму — графическое представление стадий сна. Апробация метода проводилась на трех группах испытуемых: условно здоровых, пациентах с болезнью Паркинсона и пациентах с ночным апноэ.

Цель настоящего исследования — разработать метод разметки стадий сна, основанный на рекуррентном анализе.

1. Методика

1.1. Описание нейрофизиологического эксперимента. Испытуемые добровольно участвовали в эксперименте на бесплатной основе. Все испытуемые подписали информированное согласие на участие в клиническом исследовании, получили все необходимые разъяснения

по поводу исследования и дали согласие на последующую публикацию результатов исследования. Собранные экспериментальные данные обрабатывались с учетом конфиденциальности и анонимности участников исследования. Все процедуры, выполненные в исследованиях с участием людей, соответствовали Хельсинкской декларации 1964 года и ее более поздним поправкам. Все клинические данные и дизайн клинического исследования были одобрены местным комитетом по этике исследований.

В наше исследование были включены данные 32 испытуемых старше 18 лет, распределенные по трем группам. В группу условно здоровых испытуемых (группа номер 1) вошли практически здоровые участники исследования ($N = 14$, средний возраст 46.7 ± 19.5 лет, медиана возраста 40 лет, соотношение мужчин и женщин 9/5). В группу пациентов с болезнью Паркинсона (группа номер 2) вошли пациенты с этим заболеванием ($N = 8$, средний возраст 57.0 ± 12.3 лет, медиана возраста 56 лет, соотношение мужчин и женщин 5/3). В группу пациентов с апноэ (группа номер 3) вошли лица с ночной дыхательной недостаточностью в форме синдрома обструктивного апноэ сна (ОАС) ($N = 10$, средний возраст 54.0 ± 17.1 лет, медиана возраста 46 лет, соотношение мужчин и женщин 6/4). Каждый испытуемый участвовал в полисомнографическом (ПСГ) исследовании дважды с интервалом в 1–3 ночи в специально оборудованной лаборатории сна. Продолжительность сна составляла 6–9 часов, с 21:30–23:30 до обычного времени пробуждения.

Запись полисомнографии включала электрокардиограмму (ЭКГ), сигналы функции дыхания, окулографию (ОКГ), электромиограмму (ЭМГ) и шесть сигналов электроэнцефалограммы (ЭЭГ), зарегистрированных во время ночного сна. Сигнал ЭКГ регистрировали в стандартном отведении I по Эйнтховену. Респираторные сигналы регистрировали с помощью датчика температуры ороназального потока и датчика храпа. Сигналы ЭМГ регистрировались на подбородке, правом предплечье и левой голени пациента. Сигналы ОКГ включали записи горизонтальных и вертикальных движений глаз.

Сигналы ЭЭГ регистрировали в 6 стандартных отведениях по схеме 10–20. Использовались следующие каналы: O1, O2, T3, T4, Fp1, Fp2. Сигналы ЭЭГ фильтровались с полосой пропускания 0.1...40 Гц и дискретизировались с частотой 500 Гц и $\Delta t = 0.002$ с. Запись каждого канала ЭЭГ можно рассматривать как отдельный одномерный сигнал $x(t_i)$.

Все ПСГ были проверены сертифицированным специалистом по медицине сна с целью стадирования ночного сна. Стадирование сна проводилось по стандартным эпохам (30-секундные отрезки записи). Любой сон начинается со стадии бодрствования, характеризующейся прежде всего альфа-волнами. Если активность альфа-ритма занимает более 50% эпохи, то эту эпоху называют состоянием бодрствования. Наибольшая мощность альфа-ритма наблюдается в затылочных отведениях (O1, O2). Первая стадия (N1 медленного сна) характеризуется уменьшением амплитуды волн и появлением визуально выраженного тета-ритма, наблюдаемого во всех отведениях примерно одинаково. Второй этап (N2) начинается с появления К-комплексов и характерных веретен сна. Третья стадия (N3) сна характеризуется мощной медленноволновой активностью и развитием выраженных дельта-волн. Кроме того, иногда выделяют четвертую стадию сна, характеризующуюся дальнейшим увеличением амплитуды дельта-активности, которая лучше всего визуализируется в лобных отведениях (Fp1, Fp2). Третью и четвертую стадии сна принято рассматривать как единый блок. Быстрый сон характеризуется низкоамплитудной смешанной частотой без К-комплексов и сонных веретен, низким мышечным тонусом подбородка (ЭМГ подбородка образует изолинию) с одновременными быстрыми движениями глазных яблок и так называемыми зеркальными волнами на электроокулографии (ЭОГ).

1.2. Рекуррентный анализ. Одним из методов нелинейной динамики, применяемым для анализа различных данных, является рекуррентный анализ, который позволяет установить взаимосвязи и корреляции между сигналами в сложных распределенных системах [4]. Данный метод нашел применение в широком диапазоне задач обработки сложных сигналов различной

природы [5]. Сам алгоритм расчета отличается простотой [6], что делает его перспективным для работы с большими данными и обработкой сигналов в реальном времени. Рассмотрим сигнал $x(t)$, значения которого известны в моменты времени t_i , где $i = 1, \dots, n$. Для него можно построить рекуррентную матрицу по следующему правилу:

$$R_{i,j} = \theta(\varepsilon - \|x(t_i) - x(t_j)\|), \quad (1)$$

где $R_{i,j}$ — элемент рекуррентной матрицы для сигнала x ; t_i и t_j — моменты времени t ; ε — эмпирически определенное пороговое значение, обеспечивающее необходимую точность метода;

θ — функция Хевисайда, которая принимает нулевое значение для отрицательных аргументов и единичное при неотрицательных. Таким образом, если в момент времени t_j сигнал вернулся в ε -окрестность значения сигнала в момент времени t_i , то в рекуррентной матрице будет 1.

Для оценки количества повторов в сигнале используется рекуррентный показатель, являющийся суммой всех ненулевых значений рекуррентной матрицы, нормированной на ее размер [7]. Такой показатель может быть рассчитан для каждого анализируемого сигнала x по всей длине временного ряда или по небольшому временному фрагменту. Из-за очень большого объема данных в сигналах полисомнографии рекуррентный показатель стоит рассчитывать для относительно небольших временных фрагментов в скользящем временном окне.

Примерная схема расчета показана на рис. 1. Для расчета рекуррентных показателей были использованы временные окна по 60 секунд, что включает 30 000 отсчетов сигнала, с шагом смещения окна в 30 секунд. Это соответствует экспертной разметке стадий сна на гипнограмме и позволяет определить среднее значение рекуррентного показателя для каждой стадии сна.

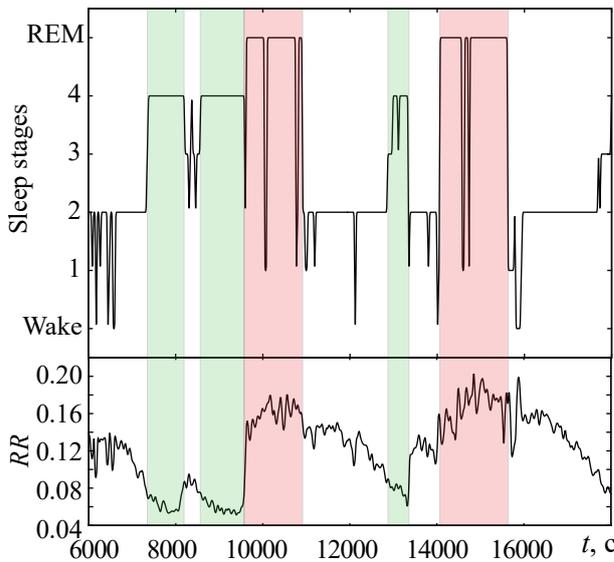


Рис. 1. Гипнограмма для одного из испытуемых, на которой показаны случаи пробуждения, стадии быстрого сна и четыре стадии медленного сна. Ниже приведены значения рекуррентных показателей, рассчитанные в соответствующих временных окнах. Зеленым цветом выделены 3 и 4 стадии сна, красным — стадии быстрого сна (цвет онлайн)

Fig. 1. Hypnogram for one of the subjects, which shows the cases of awakening, stages of REM sleep and four stages of non-REM sleep. Below there are the values of the recurrent indicator calculated in the corresponding time windows. Stages 3 and 4 of sleep are marked in green, stages of REM sleep are marked in red (color online)

1.3. Метод определения стадий сна. Теперь для различных стадий сна возможно провести простой статистический анализ, например такой, как показано на рис. 2. На рисунке приведены разбросы рекуррентного показателя для каждой стадии сна, нормированные на средний рекуррентный показатель по всей полисомнографической записи для всех трех групп испытуемых. Здесь хорошо заметно, что рекуррентные показатели пробуждений, первой и второй стадий сна примерно совпадают со средним по всему сигналу показателем. А вот стадии 3 и 4, а также стадия сна с быстрыми движениями глаз (БДГ) сильно отличаются. Для медленного сна рекуррентный показатель снижается, для быстрого сна увеличивается. Данные получены для тридцати двух человек, каждый из которых проходил полисомнографическое исследование на протяжении двух ночей подряд.

В соответствии с данными на рис. 2 можно предложить довольно простой метод определения стадий быстрого и медленного сна. Хорошо заметно, что стадии медленного сна демонстрируют уменьшение, а быстрого сна — увеличение рекуррентного показателя.

Таким образом, алгоритм разметки быстрых и медленных стадий сна представляет собой следующую последовательность действий.

- i. Поиск максимального и минимального значения рекуррентных показателей для данной гипнограммы.
- ii. Определение значений RR^1 и RR^2 по следующим правилам: $RR^1 = RR_{\min} + 0.3 \cdot (RR_{\max} - RR_{\min})$, $RR^2 = RR_{\max} - 0.4 \cdot (RR_{\max} - RR_{\min})$.
- iii. Определение стадий сна по следующим правилам: если рекуррентный показатель $RR < RR^2$, то отмечаются стадии сна 3 и 4; если $RR > RR^1$, то отмечается стадия БДГ-сна; если $RR^1 < RR < RR^2$, то отмечаются стадии сна 1 и 2.

Данный метод имеет как ряд очевидных преимуществ, так и серьезных недостатков. К преимуществам можно отнести его простоту и скорость вычислений. Это очень важно и для быстрой постобработки данных полисомнографии (из-за их большого объема), и для реализации устройств анализа стадий сна в реальном времени (где быстродействие расчетов играет решающую роль). Также рекуррентный анализ применим для любых типов сигналов, а значит, возможно использовать один и тот же метод и для обработки ЭЭГ и для анализа ЭКГ-данных, полученных во время одной записи. Если схожий простой способ маркировки стадий сна будет выявлен и для данных, полученных из анализа данных ЭКГ, это сильно упростит возможную диагностику нарушений сна, так как запись ЭКГ-сигнала осуществить значительно проще и дешевле, что очень важно для приборов персонализированной медицины.

К недостаткам метода относится невозможность разделения между собой стадий 1 и 2, а также 3 и 4. Более того, в рамках приведенного алгоритма нет возможности выделить случаи пробуждения, которые очень важны для оценки качества сна. Также важным моментом является выбор правил для определения значений RR^1 и RR^2 , так как необходимо для большей точности метода определять их каждый раз не только для нового испытуемого, но и для каждой его полисомнографической записи. Однако, по понятным причинам, это невозможно в случае использования метода в практических целях для разметки стадий сна. Конкретные значения (0.3 и 0.4) рекуррентных параметров были выбраны по имеющейся подборке полисомнографических записей с гипнограммами, размеченными специалистами, таким образом, чтобы ошибки в определении стадий сна были минимальны. Однако уверенности в том, что данные значения рекуррентных параметров являются универсальными, нет.

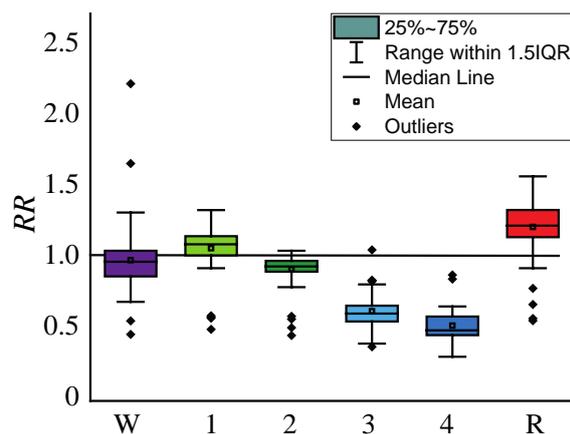


Рис. 2. Статистические закономерности испытуемых для различных стадий сна (цвет онлайн)

Fig. 2. Statistical patterns of subjects for different stages of sleep (color online)

2. Результаты

Для оценки точности метода разметки стадий сна с использованием рекуррентного анализа были использованы данные условно здоровых испытуемых (14 человек), пациентов с болезнью Паркинсона (8 человек) и пациентов с апноэ (10 человек). Точность метода рассчитывалась как отношение числа 30-секундных интервалов, для которых стадия сна определена правильно (по оценке специалиста-сомнолога) к общему числу 30-секундных интервалов в записи. Результаты применения метода на группах испытуемых продемонстрированы в Таблице.

Значения средней точности метода для различных групп испытуемых приняли следующий вид: 72.46% для условно здоровых испытуемых, 67.81% для пациентов с болезнью Паркинсона

Таблица. Точность применения метода разметки стадий сна для трех групп испытуемых с использованием рекуррентного анализа по отношению к гипнограммам, размеченным специалистами

Table. Accuracy of applying the method of marking sleep stages for three groups of subjects using recurrent analysis in relation to hypnograms marked by specialists

№ Group 1	Method accuracy	№ Group 2	Method accuracy	№ Group 3	Method accuracy
1	80.37578288	1	53.49753695	1	63.26742976
2	68.53002070	2	71.57652474	2	89.11088911
3	60.24973985	3	78.33333333	3	92.86442406
4	81.89386056	4	69.50053135	4	79.44214876
5	73.34004024	5	66.88034188	5	74.49392713
6	74.90974729	6	64.94192186	6	83.95061728
7	86.90344062	7	72.40356083	7	80.55842813
8	66.55092593	8	58.21138211	8	70.81632653
9	78.76923077			9	70.67209776
10	75.74819401			10	75.39370079
11	61.87500000				
12	60.81081081				
13	80.74921956				
14	58.49843587				

и 77.902% для пациентов с апноэ. Результаты по точности не являются идеальными, но демонстрируют хороший потенциал для последующей модификации данного метода. Стоит отметить, что наилучшие результаты получены для пациентов с апноэ. Это означает, что для них усредненные характеристики повторения динамики сигналов ЭЭГ различных испытуемых наиболее близки. Для пациентов с болезнью Паркинсона, напротив, точность ниже всего, что говорит об очень большой неустойчивости повторений динамики во время сна.

Заключение

В рамках настоящей работы представлен метод разметки стадий сна, основанный на анализе значений рекуррентных показателей, рассчитанных во временных окнах для полисомнографических записей ЭЭГ. Метод был апробирован на трех группах испытуемых: условно здоровых, пациентах с болезнью Паркинсона и пациентах с ночным апноэ. Метод позволяет проводить быструю разметку и строить гипнограмму, выделяя медленные (1–2 и 3–4) и быстрые (БДГ) стадии сна. Средняя точность метода превышает 72.5%. Полученная точность представляется достаточно хорошим результатом по сравнению с существующими методами автоматической разметки стадий сна, например в [2] точность колеблется в зависимости от числа выделяемых стадий от 65 до 80 процентов. А в работе [8] с использованием нейронных сетей точность немного превышает 80 процентов. Однако необходимо отметить, что предлагаемый в работе метод существенно проще в реализации. Затраченное на построение гипнограммы время редко упоминается в статьях, но с учетом простоты расчета рекуррентных показателей, скорее всего, оно выше, чем для предлагаемого метода. А с учетом длительности полисомнографических записей простота и скорость вычисления становится важным фактором для выбора метода распознавания стадий сна.

Необходимо отметить, что точность метода для условно здоровых испытуемых совпадает со средней по трем группам, для пациентов с болезнью Паркинсона точность метода ниже средней, а для пациентов со случаями ночного апноэ, напротив, выше средней. Данный эффект, скорее всего, связан с тем, что средний разброс рекуррентного показателя для пациентов с болезнью Паркинсона выше, а для пациентов с апноэ ниже, чем для условно здоровых испытуемых.

References

1. Ebrahimi F, Alizadeh I. Automatic sleep staging by cardiorespiratory signals: a systematic review. *Sleep and Breathing*. 2002;26(2):965–981. DOI: 10.1007/s11325-021-02435-8.
2. Mikkelsen KB, Villadsen DB, Otto M, Kidmose P. Automatic sleep staging using ear-EEG. *BioMedical Engineering OnLine*. 2017;16(1):111. DOI: 10.1186/s12938-017-0400-5.
3. Parro VC, Valdo L. Sleep-wake detection using recurrence quantification analysis. *Chaos*. 2018;28(8):085706. DOI: 10.1063/1.5024692.
4. Acharya UR, Sree SV, Swapna G, Martis RJ, Suri JS. Automated EEG analysis of epilepsy: A review. *Knowledge-Based Systems*. 2013;45:147–165. DOI: 10.1016/j.knosys.2013.02.014.
5. Acharya UR, Sree SV, Chattopadhyay S, Yu W, Ang PCA. Application of recurrence quantification analysis for the automated identification of epileptic EEG signals. *International Journal of Neural Systems*. 2011;21(3):199–211. DOI: 10.1142/S0129065711002808.
6. Eckmann JP, Kamphorst SO, Ruelle D. Recurrence plots of dynamical systems. *Europhysics Letters*. 1987;4(9):973–977. DOI: 10.1209/0295-5075/4/9/004.
7. Ramos AMT, Builes-Jaramillo A, Poveda G, Goswami B, Macau EEN, Kurths J, Marwan N. Recurrence measure of conditional dependence and applications. *Phys. Rev. E*. 2017;95(5):052206. DOI: 10.1103/PhysRevE.95.052206.
8. Zhu L, Wang C, He Z, Zhang Y. A lightweight automatic sleep staging method for children using single-channel EEG based on edge artificial intelligence. *World Wide Web*. 2022;25(5):1883–1903. DOI: 10.1007/s11280-021-00983-3.



Емельянова Елизавета Петровна — окончила СГУ в 2022 году по направлению «Прикладные математика и физика». Область научных интересов — междисциплинарное направление нейронауки, включающее в себя анализ сложных нелинейных сигналов различной биомедицинской природы и разработка новых методов и подходов к анализу таких сигналов.

Россия, Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
E-mail: meretari@ya.ru
ORCID: 0000-0001-5535-8921
AuthorID (eLibrary.Ru): 1153331



Сельский Антон Олегович — окончил факультет нелинейных процессов СГУ (2011). Кандидат физико-математических наук (2014). Доцент кафедры «Физика открытых систем» СГУ (с 2017). Область научных интересов — междисциплинарное направление нейронауки, включающее в себя анализ сложных сигналов различной биомедицинской природы и разработка новых методов и подходов к анализу таких сигналов.

Россия, Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н. Г. Чернышевского
E-mail: selskiiao@gmail.com
ORCID: 0000-0003-3175-895X
AuthorID (eLibrary.Ru): 643422