

УДК 681.7

**РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ И ИССЛЕДОВАНИЯ
ВЫСОКОТОЧНОЙ МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ
СРАВНЕНИЙ И ПЕРЕДАЧИ ШКАЛ ВРЕМЕНИ
(СОДС ШВ-М) ПО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ
ЛИНИИ СВЯЗИ**

С.С. Донченко

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
donchenko_ss@vniiftri.ru*

Аннотация. В работе описан принцип действия модернизированной системы одно- и двухсторонних сравнений и передачи шкал времени (СОДС ШВ-М). Представлены результаты разработки СОДС ШВ-М и приведены результаты метрологических исследований системы. Приведены результаты оценки температурных коэффициентов вносимой аппаратной задержки. Оценена погрешность передачи шкал времени, измерено СКДО, вносимое при передаче сигналов частоты.

Ключевые слова: синхронизация шкал времени, волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС), передача эталонных сигналов.

**RESULTS AND STUDIES OF A HIGH-PRECISION
MODERNIZED SYSTEM OF COMPARISONS
AND TRANSMISSION OF TIME SCALES (SODS TS-M)
OVER A FIBER-OPTIC COMMUNICATION LINE**

S.S. Donchenko

*FSUE "VNIIFTRI", Mendeleev, Moscow region, Russia,
donchenko_ss@vniiftri.ru*

Annotation. The paper describes the principle of operation of the modernized system of one- and two-way comparisons and transmission of time scales (SOTCT-M). The results of the development of (SOTCT-M), and the results of metrological studies of the system are presented. The results of evaluating the temperature coefficients affecting the hardware delay are presented. The error in the transmission of time scales was estimated, and the ADEV added during the transmission of frequency signals was measured.

Key words: synchronization of time scales, FOL, transmission of reference signals.

Работа средств из состава ГНСС ГЛОНАСС невозможна без эталонных сигналов частоты и времени. К таким средствам можно отнести беззапросные радиотехнические средства, квантово-оптические станции (КОС), комплексы метрологического обеспечения (например, комплекс оценки энергетических характеристик сигналов) и др. Вышеперечисленные средства и комплексы обычно располагаются в полевых условиях на удалении от нескольких десятков метров до нескольких километров от источников эталонных сигналов частоты и времени (ИСЧВ).

Современные требования к системам передачи шкал времени предусматривают инструментальную погрешность не более 100–200 пс. Так, границы допускаемой инструментальной погрешности синхронизации шкалы времени метрологического комплекса оценки энергетических характеристик сигнала к шкале времени UTC(SU) по уровню вероятности 0,95 не должны превышать ± 100 пс.

Передача эталонных сигналов времени на расстояние свыше 100 м по коаксиальному кабелю не удовлетворяет требованиям по точности из-за дрейфа фазы сигналов вследствие флуктуаций температуры и большого ослабления сигнала. Использование перевозимых квантовых часов и метода двухсторонней передачи частоты и времени с помощью спутника позволяет достичь погрешность не лучше 500 пс.

Требуемой точности передачи эталонных сигналов можно добиться при использовании волоконно-оптических линий связи ВОЛС [1, 2]. Для прецизионной передачи по ВОЛС эталонных сигналов времени и частоты с пикосекундными погрешностями было разработано оборудование, характеристики которого представлены в таблице.

Таблица
Характеристики аппаратуры передачи эталонных сигналов по ВОЛС

Название аппаратуры	Дальность действия	Случайная погрешность (СКО)	Неисключённая систематическая погрешность (НСП)
Timetech Optical link	до 10 км	40 пс	не указана
Модемы SATRE	зависит от трансивера	70 пс	не указана
Symmetricom Optical two-way time transfer system (OTWTTS)	до 10 км	30 пс	1 нс
Модемы AGN University	> 100 км	125 пс	не указана

Случайная погрешность практически всех вышеперечисленных систем удовлетворяет требованиям по точности передачи шкал времени. Однако производителями не нормируется значение НСП аппаратуры, либо оно не соответствует требованиям по точности передачи эталонных сигналов, предъявляемым к средствам метрологического обеспечения ГНСС ГЛОНАСС.

Для решения задачи передачи эталонных сигналов к объектам наземного комплекса ГЛОНАСС по ВОЛС на расстояние до 5 км с инструментальной погрешностью синхронизации не более сотни пикосекунд предлагается модернизированная система одно- и двухсторонних сравнений шкал времени СОДС ШВ-М, функциональная схема которой представлена на рис. 1.

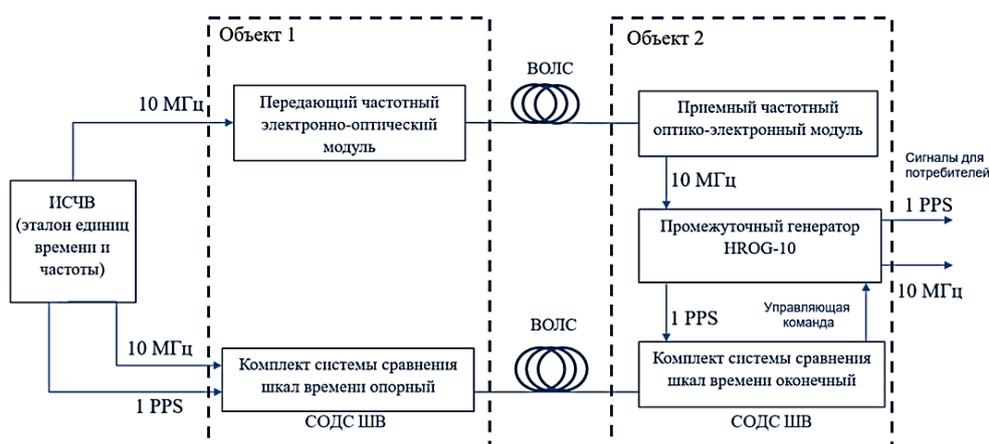


Рис. 1. Функциональная схема системы СОДС ШВ-М

Принцип действия СОДС ШВ-М состоит в следующем. С ИСЧВ сигнал опорной частоты поступает на передающий электронно-оптический модуль, который модулирует оптическую несущую радиосигналом 10 МГц. Излучение распространяется по ВОЛС до объекта, на который надо передать сигнал, там преобразуется с помощью приёмного оптико-электронного модуля обратно в радиосигнал опорной частоты.

На передаваемые эталонные сигналы частоты по ВОЛС оказывают влияние температурные флуктуации в линии, которые приводят к дрейфу фазы передаваемого сигнала. Также на точность передачи эталонного сигнала частоты влияют: поляризационно-модовая дисперсия, хроматическая дисперсия и вынужденное рассеяние Мандельштама—Бриллюэна.

В работах [2, 3] влияние вышеперечисленных факторов при передаче эталонных сигналов на расстояние до 5 км было оценено и измерено. Среднее квадратическое двухвыборочное отклонение (СКДО) частоты передаваемого сигнала составляет не более $4 \cdot 10^{-16}$, что позволяет передавать опорную частоту без компенсации влияния возмущающих факторов.

Переданный по ВОЛС сигнал опорной частоты подаётся на промежуточный генератор HROG, который формирует метки времени и управляет их фазой, а также может задавать отстройку выходной частоты. С выходов ПГ сигнал 10 МГц подаётся на комплект аппаратуры для усиления и распределения сигналов секундных меток и опорных частот, которые формируют/распределяют сигналы 5, 10, 100 МГц и 1 PPS для потребителей.

Контроль положения секундной метки, формируемой HROG относительно эталонной, осуществляет система одно- и двусторонних сравнений шкал времени (СОДС ШВ) [4, 5]. Система состоит из двух разнесённых частей, располагаемых на разных объектах (рис. 2). На вход системы поступают секундные метки сравниваемых шкал времени (эталонной и переданной, поступающей с выхода буферного усилителя-распределителя).

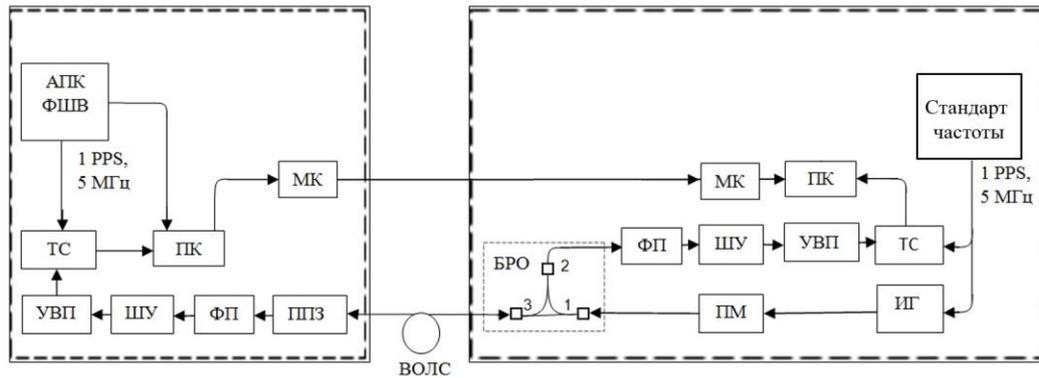


Рис. 2. Функциональная схема системы СОДС ШВ:

БРО — блок оптоволоконных разветвителей-объединителей; ВОЛС — оптоволоконная линия связи; ИГ — импульсный генератор; МК — медиаконверторы; ПК — компьютеры; ПМ — передающий лазерный модуль; ППЗ — полупрозрачное зеркало; ТС — таймеры событий; УВП — устройства временной привязки; ФП — фотоприёмные модули; ШУ — широкополосные усилители

Принцип действия СОДС ШВ состоит в следующем. Генератор импульсов формирует последовательность из i импульсов (метки времени), которые преобразуются лазерным передающим модулем (ПМ) в оптические импульсы. Каждый i -й оптический импульс метки времени проходит через блок разветвителей-объединителей (БРО), где небольшая часть мощности оптического импульса поступает в фотоприёмное устройство (ФП) объекта 2 (которое состоит из фотоприёмника, усилителя и устройства временной привязки), а основная часть мощности импульса поступает в ВОЛС. Электрический сигнал с ФПУ поступает в таймер событий (ТС), что обеспечивает фиксацию метки времени t_i , переданной в линию связи, в шкале времени (ШВ) объекта 2.

Оптический импульс, пришедший по оптоволоконной линии связи в пункт 1 с некоторой временной задержкой τ_3 , через полупрозрачное зеркало поступает в ФПУ пункта 1, который преобразует его в электрический сигнал, поступающий также в ТС. Также в ТС поступает сигнал 1 PPS с ИСЧВ, что позволяет определить время прихода i -го оптического импульса τ_i^2 в ШВ объекта 1.

Часть мощности оптического импульса секундной метки, пришедшей в объект 1, отражается от полупрозрачного зеркала и проходит по линии связи обратный путь. С временной задержкой, строго равной задержке τ_3 в линии при прямом прохождении, отражённый импульс через БРО поступает на вход ФПУ объекта 2. Сигнал с ФПУ поступает на вход ТС, что позволяет зафиксировать время прихода i -го отражённого импульса τ_i^1 в ШВ объекта 2.

Измерения производятся секундными циклами. В итоге в каждом секундном цикле работы СОДС ШВ в ПК пункта 2 формируется информация о рассогласовании ШВ ΔT пунктов A и B , которое определяется по следующей формуле:

$$\Delta T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau_i^2 - \frac{\tau_i^1 + t_i}{2} + \tau_3,$$

где n — количество измерений в секундном цикле; τ_3 — аппаратурные поправки.

Внешний вид системы СОДС ШВ-М показан на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид системы СОДС ШВ-М

Аппаратурные поправки системы СОДС ШВ-М τ_3 являются одной из составляющих НСП определения расхождения опорной и формируемой на промежуточном генераторе шкал времени. Для экспериментальной оценки аппаратурных поправок была собрана установка согласно схеме, представленной на рис. 4.

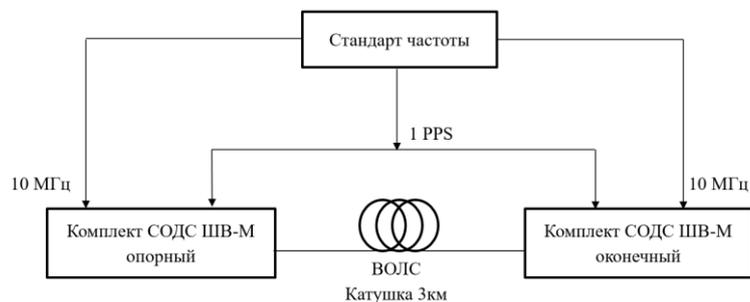


Рис. 4. Схема измерения аппаратурной поправки

В первом цикле измерений вся аппаратура была размещена в одном термостате, в качестве ВОЛС использовалась катушка с волокном длиной 3 км. На вход аппаратуры СОДС ШВ-М подавались сигналы от одного источника частоты и времени, температура при этом поддерживалась на уровне 20 °С с погрешностью $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Результат измерения аппаратурной поправки представлен на рис. 5.

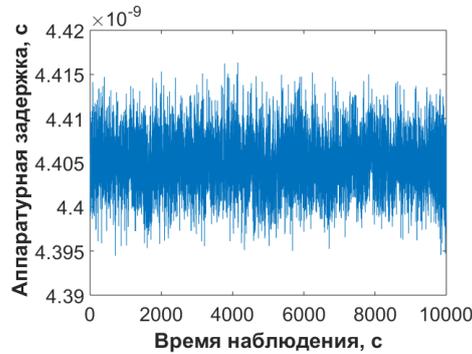


Рис. 5. Схема измерения аппаратурной поправки

Среднее значение поправки составило $4,405 \cdot 10^{-9}$ с, СКО измерений — 3,2 пс. Далее оценивалось влияние температуры на аппаратурную поправку отдельно для опорного и оконечного комплектов. Для этого исследуемый комплект аппаратуры помещался в термостат, диапазон исследуемых температур был выбран от 15 до 30 °С для оконечного комплекта и от 20 до 30 °С для опорного. Второй комплект при этом находится вне термостата, температура поддерживалась с помощью системы кондиционирования с погрешностью $\pm 1^\circ\text{C}$. Затем комплекты менялись и оценивался температурный коэффициент для второго комплекта. Результаты измерений приведены на рис. 6а, б.

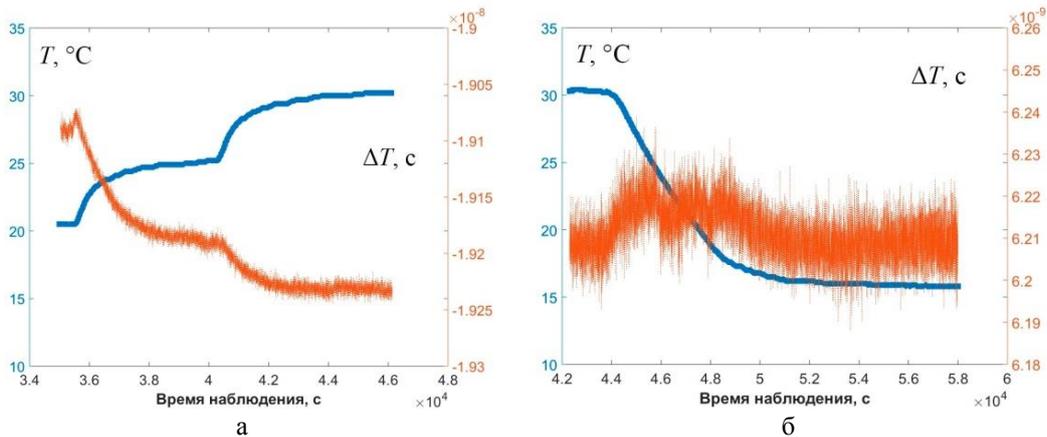


Рис. 6. Температурная зависимость аппаратурных поправок для опорного (а) и оконечного (б) комплектов (абсолютные значения аппаратурных поправок различаются из-за разной длины соединительных кабелей в двух экспериментах): оранжевый цвет — аппаратурная поправка; синий цвет — температура

Как видно из рис. 6а, к термостабилизации опорного комплекта предъявляются жёсткие требования, так как изменение аппаратурной поправки составляет $16 \text{ пс}/^\circ\text{C}$. Для достижения требований по инструментальной погрешности передачи шкал времени необходима термостабилизация опорного комплекта не хуже $\pm 1^\circ\text{C}$. Оконечный комплект изменил аппаратурную задержку на 13 пс во время изменения температуры в термокамере от 30 до 15°C (рис. 6б). После того, как изменение температуры прекратилось, значение аппаратурной поправки вернулось к первоначальному значению. Таким образом, температурная стабилизация окончного комплекта СОДС ШВ-М не требуется в температурном диапазоне от 15 до 30°C .

После исследований аппаратуры на короткой базе она была размещена на месте штатного базирования: опорный комплект подключается к комплексу хранения шкалы времени (КХШВ), окончный комплект размещается в метрологическом комплексе оценки энергетических характеристик навигационных сигналов (КУНГ). Расстояние между объектами составляет 900 м (длина ВОЛС).

Для исследования погрешности передачи шкал времени аппаратуры СОДС ШВ-М использовался серийно выпускаемый комплект аппаратуры Timetech Optical Link, состоящий из опорного устройства Timetech Source #10568 и окончного устройства Timetech Termination #10569. Схема измерений представлена на рис. 7.

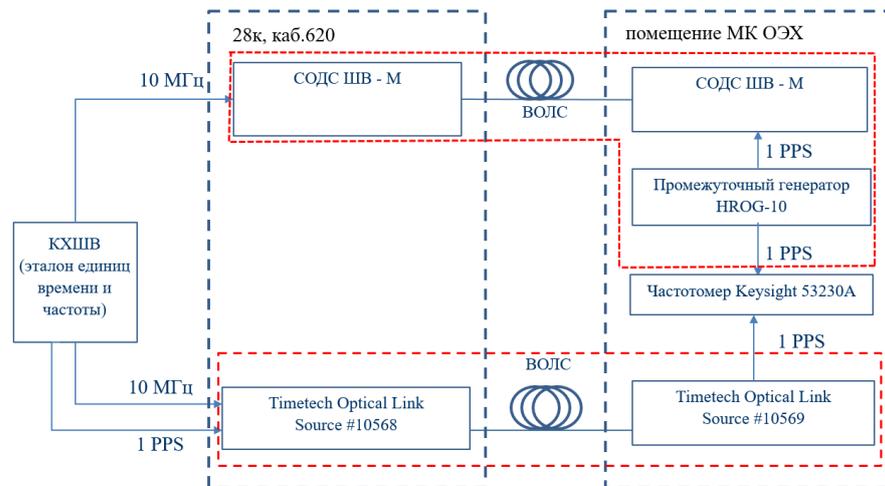


Рис. 7. Схема измерения расхождения шкал времени, формируемых СОДС ШВ-М и КХШВ, передаваемых с помощью Timetech Optical Link

Комплект Timetech Optical Link калибровался на нулевой базе с помощью частотомера Keysight 53230А. Погрешность калибровки составила $\approx 50 \text{ пс}$. После калибровки устройство Timetech Source #10568 размещалось совместно с опорным комплектом СОДС ШВ-М в помещении КХШВ, при этом

на них подавались одни и те же сигналы 10 МГц и 1 Гц. Оконечное устройство СОДС ШВ-М совместно с устройством Timetech Termination #10569 размещалось в помещении МК ЭОХ, сигналы от оконечных устройств сравнивались с помощью частотомера Keyight 53230A. Результат измерений приведён на рис. 8.

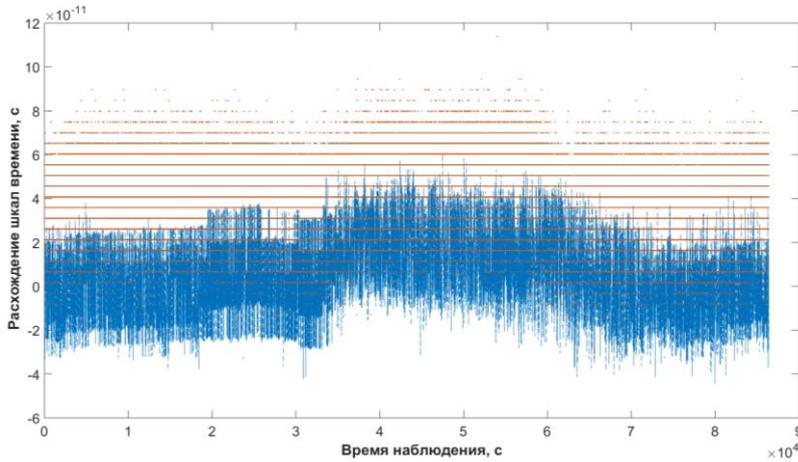


Рис. 8. Результат измерения расхождения шкал времени, формируемых СОДС ШВ-М (синий цвет) и КХШВ, передаваемых с помощью Timetech Optical Link (оранжевый цвет)

СКО измерений расхождения шкал времени с помощью аппаратуры СОДС ШВ-М составило 15 пс, СКО измерений расхождения шкал времени между СОДС ШВ-М и Timetech Termination #10569 составило 22 пс. Среднее расхождение шкал времени между шкалами составило 45 пс, что не превышает погрешности калибровки контрольной аппаратуры. На основании данных о расхождении шкал времени, полученных с помощью СОДС ШВ-М, было оценено СКДО частоты, вносимое при передаче сигналов частоты. Результаты приведены на рис. 9.

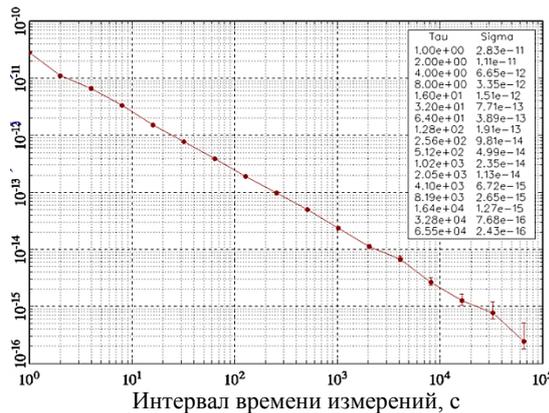


Рис. 9. Результат измерений вносимого СКДО при передаче частоты с помощью аппаратуры СОДС ШВ-М

На интервале времени измерений 1 с вносимая нестабильность составляет $2 \cdot 10^{-11}$, что обусловлено продолжительностью цикла подстройки HROG, равной 1 с. На интервале времени измерений 1 сут значение вносимой СКДО составляет уже $2 \cdot 10^{-16}$.

Значение НСП измерений расхождения шкал времени, обусловленной погрешностью учёта разности задержек между каналами таймера событий и погрешностью учёта задержек в коаксиальных кабелях и другой аппаратуры, не превышает 44 пс.

Суммарная инструментальная погрешность синхронизации шкал времени СОДС ШВ-М при доверительной вероятности 95 % составила ± 60 пс. Таким образом, разработанная система СОДС ШВ-М по своим метрологическим характеристикам превосходит существующие системы и соответствует современным требованиям по передаче шкал времени в комплексах ГЛОНАСС.

Список литературы

1. Rost M., Piester D., Yang W., Feldmann T., Wübbena T., Bauch A. Time transfer through optical fibers over a distance of 73 km with an uncertainty below 100 ps // Submitted to Metrologia. August, 2012. — P. 772–778.
2. Федорова Д.М., Балаев Р.И., Курчанов А.Ф., Троян В.И., Малимон А.Н. Передача эталонных радиочастот по волоконно-оптической линии с электронной компенсацией возмущений // Измерительная техника. — 2015. — № 9. — С. 34–37.
3. Балаев Р.И., Шибаева Д.М., Малимон А.Н., Курчанов А.Ф. Характеристики фазостабильных коаксиальных и оптических кабелей, используемых для передачи информации об эталонном времени и частоте // Альманах современной метрологии. — 2015. — № 2. — С. 165–179.
4. Донченко С.С., Колмогоров О.В., Прохоров Д.В. Система одно- и двухсторонних сравнений шкал времени // Измерительная техника. — 2015. — № 1. — С. 14–17.
5. Донченко С.С., Колмогоров О.В., Прохоров Д.В. Синхронизация шкал времени удалённых объектов с помощью системы одно- и двухсторонних сравнений // Мир измерений. — 2016. — № 3 (173). — С. 26–29.

Статья поступила в редакцию: 01.09.2021 г.

Статья прошла рецензирование: 01.10.2021 г.

Статья принята в работу: 12.10.2021 г.