

УДЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ОСАДКОВ, ВЫПАДАЮЩИХ В ТВЕРИ

Ф.В. Качановский

Тверской государственной технической университет (г. Тверь)

© Качановский Ф.В., 2020

Аннотация. Проведен статистический анализ динамики удельной электропроводности атмосферных осадков, выпавших в Твери в 2016–2019 гг. Построена математическая модель статистического ряда удельной электропроводности осадков. Установлен слабый рост удельной электропроводности в 2016–2019 гг.

Ключевые слова: удельная электропроводность, кислотность, атмосферные осадки, модель, временной ряд, тренд, циклическая компонента, сезонная компонента, случайная компонента, показатель кислотности pH , направление ветра.

DOI: 10.46573/2658-7459-2020-4-89-97

Существенной количественной оценкой способности водного раствора проводить электрический ток является электропроводность воды. В природных условиях она обусловлена содержанием растворенных минеральных солей и температурой. Удельная электропроводность воды (мкСм/см) – приблизительный показатель суммарной концентрации электролитов – используется в наблюдениях за состоянием водной среды и служит суммарным индикатором антропогенного воздействия.

Наблюдения за электропроводностью осадков, выпадающих в Твери, проводятся лабораторией мониторинга окружающей среды Тверского центра по гидрометеорологии с 2016 г. За четыре года (2016–2019) произведены 494 измерения (около 10 измерений в месяц). Интервалы между срочными измерениями изменяются от одних суток до двух декад. Временная последовательность срочных значений удельной электропроводности, здесь и далее обозначаемая как sw , представлена на рис. 1. Значения sw группируются в основном в интервале 0–25 мкСм/см, хотя отдельные редкие «выбросы» превышают 70 мкСм/см.

Одновременно с наблюдениями за sw проводятся наблюдения за показателем кислотности pH , количеством выпадающих осадков pre , температурой воздуха t , а также направлением win и скоростью ветра v .

Настоящая публикация содержит результаты статистического анализа удельной электропроводности осадков sw , выпавших в Твери в 2016–2019 гг. Анализ начат в 2019 г., результаты анализа трехлетних наблюдений опубликованы в [1]. Последовательность sw рассматривается как нестационарный временной ряд [2].

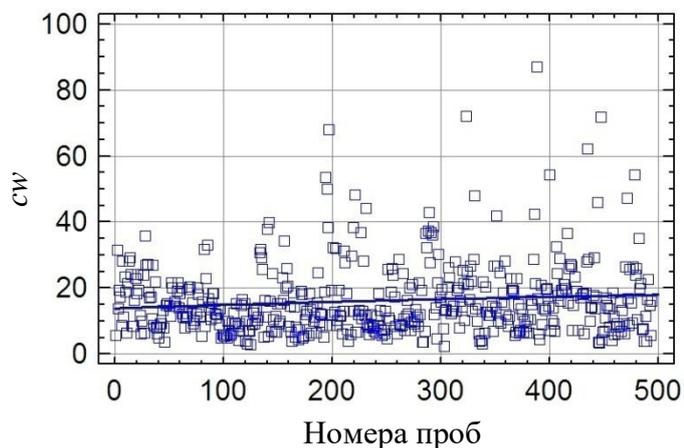


Рис. 1. Ряд срочных значений и квадратический тренд удельной электропроводности cw за 2016–2019 гг.

Наибольший практический интерес представляет тренд ряда. В качестве модели тренда принята полиномиальная кривая регрессии. Характер значений cw показывает (см. рис. 1), что для предварительного анализа приемлемы модели 1-го и 2-го порядка. Уравнения моделей имеют вид:

$$cw = 14,9013 + 0,00467758n; \quad (1)$$

$$cw = 13,8331 + 0,0109582n - 0,00000549024n^2, \quad (2)$$

где n – порядковый номер члена ряда. Уравнения (1) и (2) свидетельствуют о медленном росте значений cw с течением времени, причем квадратическая модель (показана на рис. 1) обнаруживает некоторое замедление роста.

Установлена умеренно слабая положительная связь между срочными значениями удельной электропроводности cw и показателя кислотности pH , оцениваемая коэффициентом корреляции 0,20234 (на доверительном уровне 95 %). С ростом показателя pH электропроводность cw растет (рис. 2), значит, электропроводность осадков увеличивается при снижении их кислотности.

Относительно слабая зависимость удельной электропроводности cw от суточного количества выпадающих осадков pre (в мм) характеризуется коэффициентом корреляции – 0,210906 (на 95%-м уровне доверительной вероятности) и показана на рис. 3.

Уравнение связи имеет вид

$$cw = 18,2157 - 0,429436pre. \quad (3)$$

Для установления связи между срочными значениями электропроводности cw и направления ветра win построены модели 1-го и 2-го порядка, т. е. линейная и квадратическая. Коэффициент корреляции для линейной модели составляет –0,0227416. Уравнения моделей имеют вид:

$$cw = 16,583 - 0,00290706win; \quad (4)$$

$$cw = 16,48 - 0,00131491win - 0,00000460959win^2. \quad (5)$$

Таким образом, статистически значимая связь между срочными значениями электропроводности cw и срочными значениями направления ветра win на доверительном уровне 90 % (или выше) не установлена (не существует?).

Установлена относительно слабая положительная связь (рис. 4) электропроводности cw со среднесуточными температурами воздуха t (град).

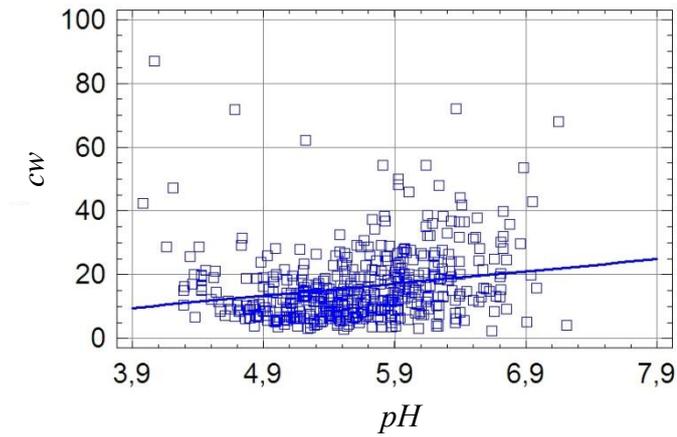


Рис. 2. Связь срочных значений электропроводности $св$ и показателя кислотности осадков pH за 2016–2019 гг.

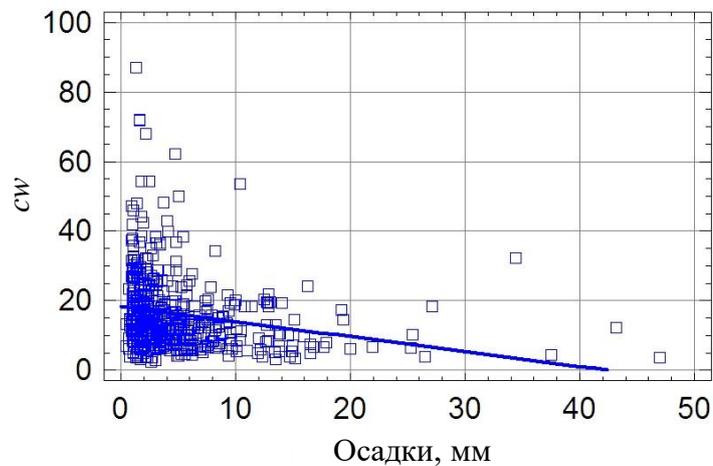


Рис. 3. Связь срочных значений электропроводности $св$ и суточного количества осадков pre за 2016–2019 гг.

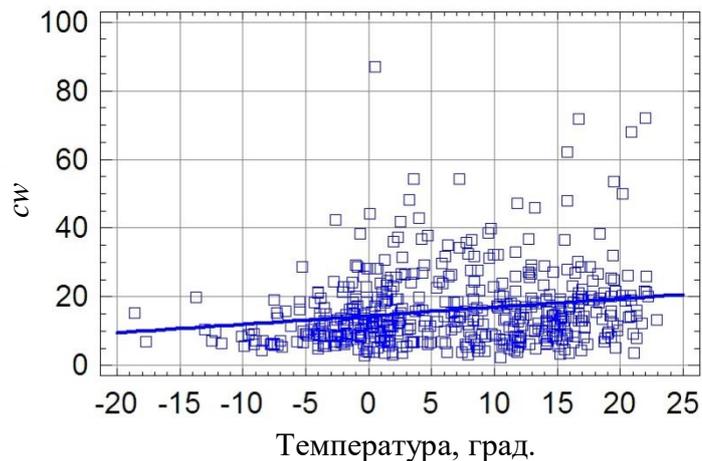


Рис. 4. Связь срочных значений электропроводности $св$ и среднесуточных температур воздуха t за 2016–2019 гг.

Коэффициент корреляции равен 0,19183, уравнение связи имеет вид

$$св = 14,4524 + 0,249723t. \quad (6)$$

Переход от наблюдавшихся (срочных) значений $св$ к среднемесячным $атсв$ позволяет рассматривать совокупность среднемесячных значений удельной электропроводности как нестационарный временной ряд из 48 членов (месяцев), показанный на рис. 5. Такой переход дает возможность обнаружить некоторые важные свойства

исследуемой величины. Из содержательных соображений относительно причин изменчивости $amcw$ принята аддитивная модель ряда $amcw$, состоящая из 4 компонент: тренда, циклической, сезонной и случайной.

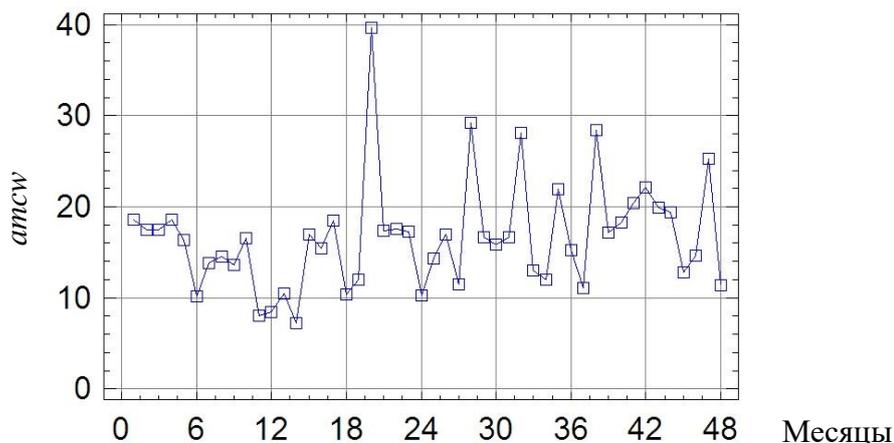


Рис. 5. Ряд среднемесячных значений удельной электропроводности $amcw$ за 2016–2019 гг.

При построении модели ряда $amcw$ видимая (наблюдаемая) изменчивость ряда в соответствии с основной идеей статистики разделена на закономерную (детерминированную) d_t и случайную ε_t составляющие:

$$amcw_t = d_t + \varepsilon_t. \quad (7)$$

Закономерная составляющая d_t может быть представлена как функция времени t . Для описания случайной составляющей ε_t необходим статистический подход.

Закономерная составляющая d_t , в свою очередь, представлена трехчленной аддитивной моделью общего вида [2]:

$$d_t = tr_t + c_t + s_t, \quad (8)$$

где tr_t , c_t , s_t – тренд, циклическая и сезонная компоненты.

На 1-м этапе декомпозиции исходного ряда $amcw$ определена сумма trc_t двух первых членов уравнения (8):

$$trc_t = tr_t + c_t. \quad (9)$$

На 2-м этапе из суммарной компоненты trc_t вычтен тренд tr_t и выделена циклическая составляющая c_t ряда $amcw$:

$$c_t = trc_t - tr_t. \quad (10)$$

Суммарная компонента trc_t (показана на рис. 6) получена сглаживанием исходного ряда $amcw$ с помощью простого арифметического скользящего среднего с интервалом сглаживания 12 значений. При этом сглаженный ряд стал короче исходного на 12 членов (не определены 6 членов в начале ряда и 6 в конце).

Наибольший интерес представляет тренд ряда $amcw$. В качестве общей модели тренда принята полиномиальная кривая регрессии. Характер значений $amcw$ в ряду показывает (см. рис. 5), что для предварительного анализа этого сравнительно короткого ряда подходят модели 2-го и 3-го порядка, т. е. квадратическая и кубическая (показаны на рис. 6).

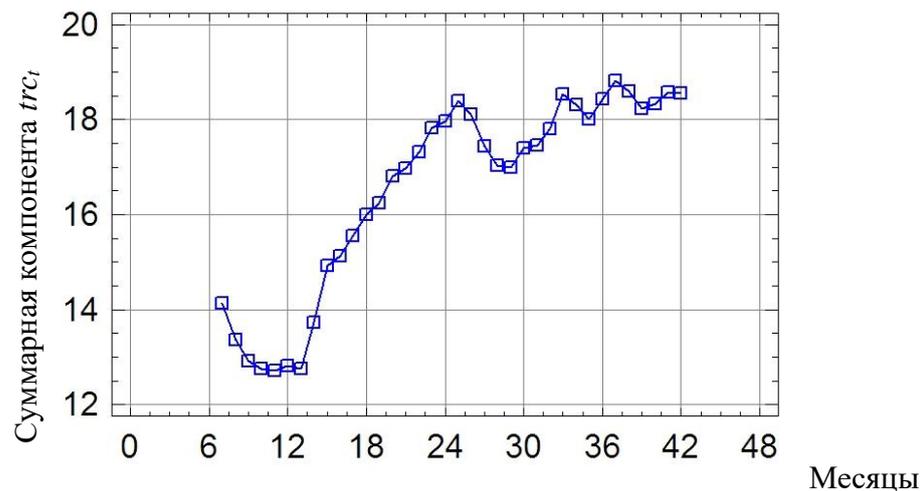


Рис. 6. Суммарная компонента trc_t (тренд + циклическая компонента) ряда $amsw$ за 2016–2019 гг.

Уравнение квадратической модели:

$$tr_{ква} = 14,1556 + 0,109514n - 0,000253528n^2; \quad (11)$$

уравнение кубической модели:

$$tr_{куб} = 18,3529 - 0,868436n + 0,0491265n^2 - 0,000671838n^3, \quad (12)$$

где n – порядковый номер члена ряда (месяца).

Квадратический тренд отражает основную (и важную) черту поведения ряда $amsw$ и его суммарной компоненты trc_t – рост значений с течением времени.

Очертания кубического тренда $tr_{куб}$ весьма схожи с таковыми у суммарной компоненты trc_t . Кроме того, совпадают по времени локальный минимум и локальный максимум обеих кривых.

Циклическая компонента c_t получена по формуле (10) в двух вариантах: А – вычитанием из trc_t квадратического тренда $tr_{ква}$; Б – вычитанием из trc_t кубического тренда $tr_{куб}$. Оба варианта c_t и соответствующие им тренды показаны на рис. 7.

Компоненту c_t , описывающую длительные подъемы и спады значений $amsw$, можно качественно оценить по ее отклонению от трендов. Продолжительность единственного цикла составляет около 24 месяцев, или около 2 лет. Значения обоих трендов на порядок больше соответствующих значений компоненты c_t . Это означает, что тренды (особенно кубический) описывают основную долю (более 90 %) детерминированной части ряда $amsw$. Стоит обратить внимание, что локальные минимум и максимум циклической компоненты практически совпадают по времени с таковыми у кубического тренда. Таким образом, кубический тренд представляется более предпочтительным для описания ряда $amsw$, чем квадратический. Что касается причин наблюдаемого характера поведения циклической компоненты, то судить о них сложно без привлечения дополнительной (не гидрометеорологической) информации.

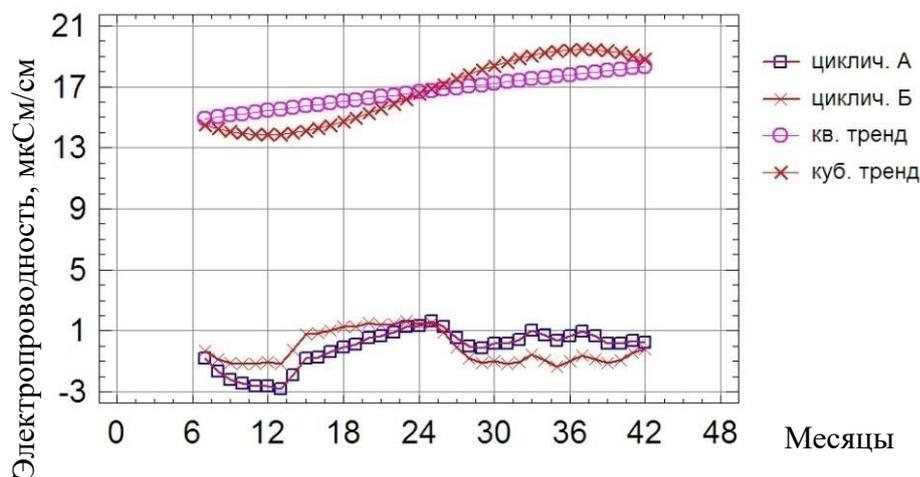


Рис. 7. Варианты циклической компоненты c_t ряда $atcsw$ и соответствующие им тренды $tr_{\text{ква}}$ и $tr_{\text{куб}}$

Оба варианта тренда, квадратический и кубический, указывают на слабый, но заметный рост с течением времени удельной электропроводности атмосферных осадков, выпавших в Твери в 2016–2019 гг.

Сезонная компонента s_t моделировалась в предположении связи поведения sw с годовым ходом метеофакторов, прежде всего, температур воздуха. Период сезонных колебаний p принят равным 12 месяцам. В качестве оценки сезонной компоненты использовано среднее \hat{s}_i отклонений значений sw от тренда, т. е. положено [2], что

$$\hat{s}_i = \frac{1}{m+1} \cdot \sum_{l=0}^m (cw_{i+lp} - \hat{tr}_{i+lp}) \text{ для } i = 1, \dots, p, \quad (13)$$

где $m + 1 = 4$ – число (годовых) периодов в ряду наблюдений.

Годовой ход сезонной компоненты (месячные индексы, вычисленные по формуле (13)), показан на рис. 8. В течение года локальные минимумы (в 3-м, 7-м и 9-м месяцах) чередуются с локальными максимумами (во 2-м, 4-м, 8-м и 11-м месяцах). Глобальный максимум соответствует 8-му месяцу года (августу), а глобальный минимум – 12-му (декабрю).

Оценена связь среднемесячных значений электропроводности $atcsw$ со среднемесячными показателями кислотности $ampH$, месячными суммами осадков $sumpre$ и среднемесячными температурами воздуха amt . Установлено существование умеренно слабой положительной связи между $atcsw$ и $ampH$ с коэффициентом корреляции 0,272486 (на доверительном уровне 95 %). У срочных значений sw и pH эта связь проявляется еще слабее. Как уже отмечалось, коэффициент ее корреляции составляет всего 0,20234. Таким образом, с ростом показателя pH (и $ampH$) растет и электропроводность sw (и $atcsw$), значит, электропроводность осадков увеличивается при снижении их кислотности.

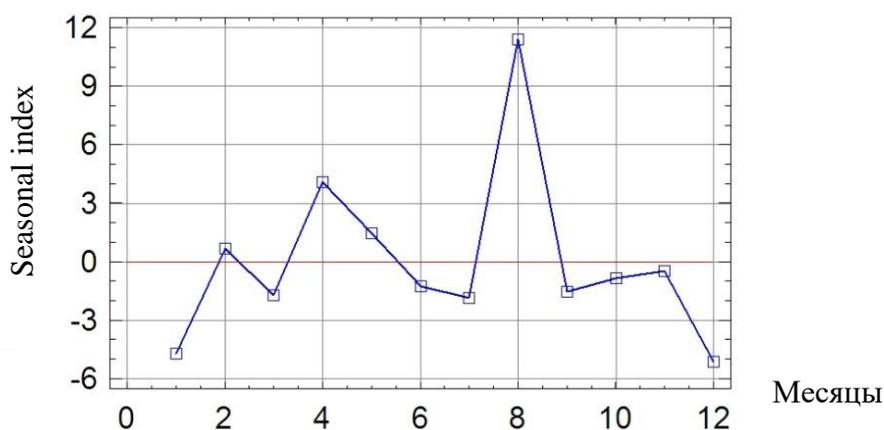


Рис. 8. Годовой ход сезонной компоненты
(месячные индексы) ряда $atcw$ за 2016–2019 гг.

Существование этой связи позволяет предположить, что характер тренда $atcw$ в течение двух десятилетий, предшествовавших началу наблюдений за электропроводностью осадков sw , имел существенное сходство с характером тренда ряда pH , наблюдавшегося в этот период.

Связь $atcw$ с месячным количеством осадков $sumpre$ сравнительно слабая отрицательная, ее коэффициент корреляции составляет $-0,240857$ (на доверительном уровне 95 %). Однако она сильнее связи электропроводности sw с суточным количеством осадков pre , коэффициент корреляции которой составляет всего $-0,210906$. В обоих случаях с ростом количества осадков их электропроводность уменьшается (по-видимому, сказывается эффект разбавления).

Связь электропроводности $atcw$ со среднемесячными температурами воздуха amt слабая положительная, ее коэффициент корреляции составляет $0,256527$ (на доверительном уровне 95 %). Связь срочных значений sw с суточными температурами воздуха t тоже слабая положительная и характеризуется еще меньшим коэффициентом корреляции $0,19183$, т. е. и эта связь слабее, чем между среднемесячными величинами, $atcw$ и amt .

Сравнение коэффициентов корреляции срочных значений обсуждаемых величин с коэффициентами корреляции среднемесячных значений этих величин показывает, что теснота связи между среднемесячными значениями существенно больше, чем между срочными значениями. Можно объяснить это снижением влияния случайных колебаний в результате осреднения срочных значений.

Случайная компонента ряда pH (показана на рис. 9) моделирована комбинированным случайным процессом авторегрессии – скользящего среднего ARMA (p, q) [2]:

$$X(t) = \sum_{i=1}^p \varphi_i \cdot X(t - i) + \varepsilon_t + \sum_{j=1}^q \theta_j \cdot \varepsilon_{t-j}, \quad (14)$$

где параметры p и q задают порядок процесса; ε_t – процесс белого шума (среднее $M\varepsilon_t = 0$, дисперсия $D\varepsilon_t = 0$); φ, θ – параметры (коэффициенты) процессов авторегрессии и скользящего среднего соответственно.

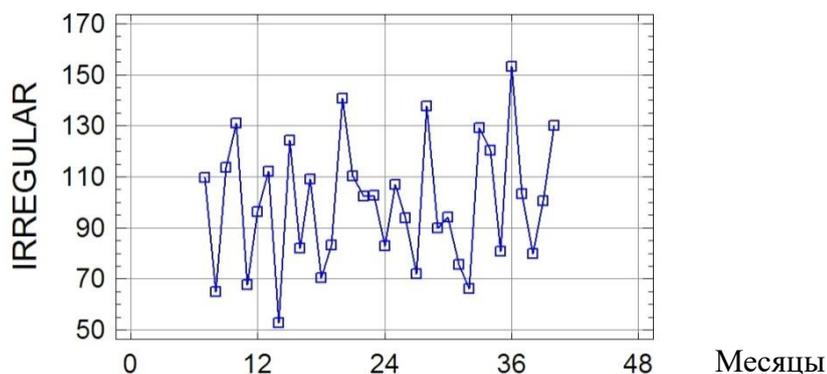


Рис. 9. Случайная компонента ряда $atcw$ за 2016–2019 гг.

Адекватное описание случайного остатка ряда $atcw$ достигается (при доверительной вероятности 95 %) при $p = 4$ и $q = 3$, что говорит о достаточно длинной (около четырехмесячной) «памяти» комбинированных процессов.

Построенная статистическая модель удельной электропроводности $atcw$ по мере накопления данных и удлинения ряда будет эволюционировать. Однако ее структура представляется достаточно устойчивой, и модель пригодна как для прогнозирования динамики sw , так и для исследования ее связей с факторами, влияющими на электропроводность.

ВЫВОДЫ

1. Построена аддитивная статистическая модель ряда удельной электропроводности осадков, выпавших в Твери в 2016–2019 гг. Модель включает тренд, циклическую, сезонную и случайную компоненты.

2. Установлены связи срочных и среднемесячных значений удельной электропроводности осадков, выпадавших в Твери в 2016–2019 гг., с соответствующими значениями показателя кислотности pH , суточного количества осадков, температуры воздуха.

3. Установлено, что направление ветра не оказывает на электропроводность осадков существенного влияния.

4. Наиболее тесная положительная связь существует между среднемесячными значениями удельной электропроводности и среднемесячными значениями показателя кислотности pH . Коэффициент корреляции связи составляет 0,272486 (на доверительном уровне 95 %).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качановский Ф.В. Электропроводность осадков, выпадающих в Твери // *Вестник Тверского государственного технического университета, Серия «Строительство, электротехника и химические технологии»*. 2019. № 3 (3). С. 65–71.
2. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Статистический анализ данных на компьютере. М.: ИНФРА-М, 1998. 528 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

КАЧАНОВСКИЙ Феликс Вячеславович – доцент кафедры гидравлики, теплотехники и гидропривода, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: felix.kachanovsky@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Качановский Ф.В. Удельная электропроводность осадков, выпадающих в Твери // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 4 (8). С. 89–97.

ELECTRICAL SPECIFIC CONDUCTIVITY OF THE PRECIPITATION IN TVER

F.V. Kachanovsky

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. Analysis had made of the precipitation's electrical specific conductivity (atmospheric precipitation had fallen in Tver in 2016–2019 years). Time series models of the electrical specific conductivity and her evolution were examined. Cubic model has considered as adequate.

Keywords: conductivity, acidity, acid rain, precipitation, model, time series, trend, cycle component, seasonal component, residuals.

REFERENCES

1. Kachanovsky F.V. Electrical conductivity of the precipitation in Tver. *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2019. No. 3 (3), pp. 65–71.

2. Tyurin Y.N., Makarov A.A. Statisticheskij analiz dannyh na komp'yutere [Statistical analysis of data on the computer]. M.: INFRA-M, 1998. 528 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

KACHANOVSKY Felix Vjacheslavovich – Associate Professor of the Department of Hydraulics, Heat Engineering and Hydraulic Drive, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: felix.kachanovscky@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Kachanovsky F.V. Electrical specific conductivity of the precipitation in Tver // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2020. No. 4 (8), pp. 89–97.