

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 674.093

**ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ОСАДКОВ,
ВЫПАВШИХ В ТВЕРИ В 2016–2022 ГГ.****Ф.В. Качановский***Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Качановский Ф.В., 2023

Аннотация. Выполнен статистический анализ влияния метеофакторов на удельную электропроводность атмосферных осадков, выпавших в Твери в 2016–2022 гг. Подтверждено и уточнено существование корреляционных связей удельной электропроводности осадков, выпадающих в Твери, с показателем кислотности pH , температурой воздуха и количеством осадков при удлинении ряда наблюдений на два года (с пяти лет до семи).

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

DOI: 10.46573/2658-7459-2023-2-36-43

Электропроводность атмосферных осадков – фактор, подверженный природным и антропогенным воздействиями. Его исследованием занимаются экологи, гидрологи и специалисты других профилей [1–9].

Начиная с 2016 г. регулярные наблюдения за электропроводностью осадков, выпадающих в Твери, проводит лаборатория мониторинга окружающей среды Тверского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. В течение 2016–2022 гг. произведены 904 измерения, в среднем 11 измерений в месяц. Удельная электропроводность осадков измеряется в микросименсах на сантиметр (мкСм/см). Ряд измеренных (срочных) значений удельной электропроводности осадков (далее обозначается как cw) и кубический тренд ряда показаны на рис. 1.

Одновременно с электропроводностью измеряется показатель кислотности осадков pH (безразмерная величина). Наблюдения за кислотностью осадков лаборатория проводит с 1990 г. Срочные измерения обеих величин, электропроводности и кислотности производятся одновременно, интервалы между измерениями варьируются от одних суток до двух декад (в соответствии с датами выпадения осадков).

В целях статистического анализа кислотности осадков срочные значения показателя pH , наблюдаемые уже более 30 лет, преобразованы в среднемесячные значения $ampH$ [3–5]. Это позволило сформировать из значений $ampH$ равномерный временной ряд с одинаковыми (месячными) интервалами, что удобно для изучения связей кислотности осадков с основными метеофакторами.

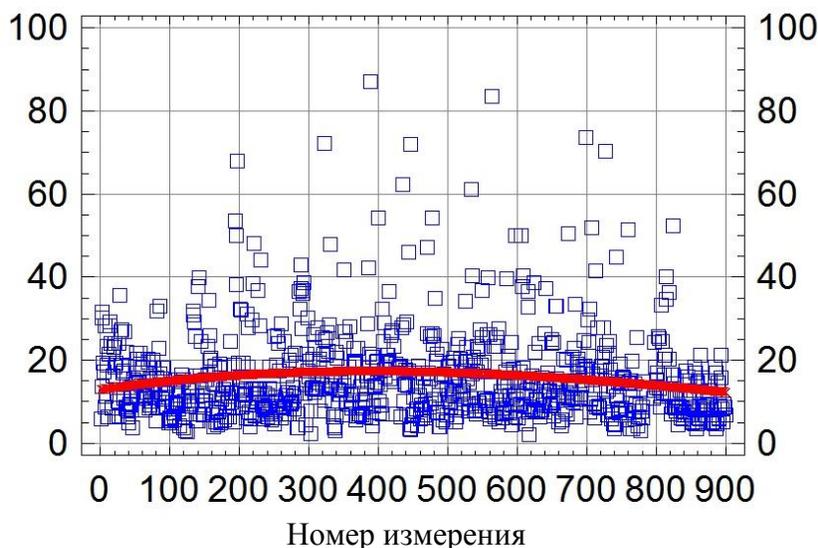


Рис. 1. Ряд измеренных значений
удельной электропроводности cw и его кубический тренд (2016–2022 гг.)

Аналогично срочные значения удельной электропроводности cw преобразованы в среднемесячные значения $amcw$, из которых построены временные ряды [5]. Наблюдения за электропроводностью непродолжительны, поэтому ряды среднемесячных значений $amcw$ имеют небольшую длину. В настоящей статье рассматриваются (сравниваются) ряды $amcw$ длиной 4 года (2016–2019), 5 (2016–2020), 6 (2016–2021) и 7 лет (2016–2022), состоящие из 48, 60, 72, 84 и 96 членов соответственно.

В работе [5] нами был подробно (применительно к четырехлетнему ряду наблюдений) обсужден вопрос о выборе модели тренда величины cw и, соответственно, величины $amcw$. В качестве моделей тренда использованы линии регрессии. Сопоставлены три модели простой регрессии: линейная, экспоненциальная и логарифмическая.

Для коротких (четырёхлетних) рядов вполне подходящей оказалась линейная модель, которой соответствует коэффициент корреляции 0,22466. В настоящей статье рассматриваются в связи с удлинением ряда наблюдений до семи лет квадратические и кубические модели трендов cw и $amcw$. На рис. 2 и 3 показаны для сравнения квадратические регрессионные модели для рядов cw и $amcw$ длиной 4, 5, 6 и 7 лет. Уравнения квадратических моделей трендов cw и $amcw$ для таких рядов имеют вид:

а) для cw :

$$\begin{aligned} cw4 &= 13,8331 + 0,0109582 \cdot n - 0,00000549024 \cdot n^2; \\ cw5 &= 14,4567 + 0,00714416 \cdot n - 0,00000442129 \cdot n^2; \\ cw6 &= 14,9057 + 0,0054197 \cdot n - 0,00000444141 \cdot n^2; \\ cw7 &= 15,1674 + 0,00491107 \cdot n - 0,00000553642 \cdot n^2 \end{aligned}$$

б) для $amcw$:

$$\begin{aligned} amcw4 &= 14,1556 + 0,109514 \cdot n - 0,000253528 \cdot n^2; \\ amcw5 &= 13,4690 + 0,207113 \cdot n - 0,00256658 \cdot n^2; \\ amcw6 &= 13,5141 + 0,197772 \cdot n - 0,00232182 \cdot n^2; \\ amcw7 &= 13,3917 + 0,207818 \cdot n - 0,00245135 \cdot n^2. \end{aligned}$$

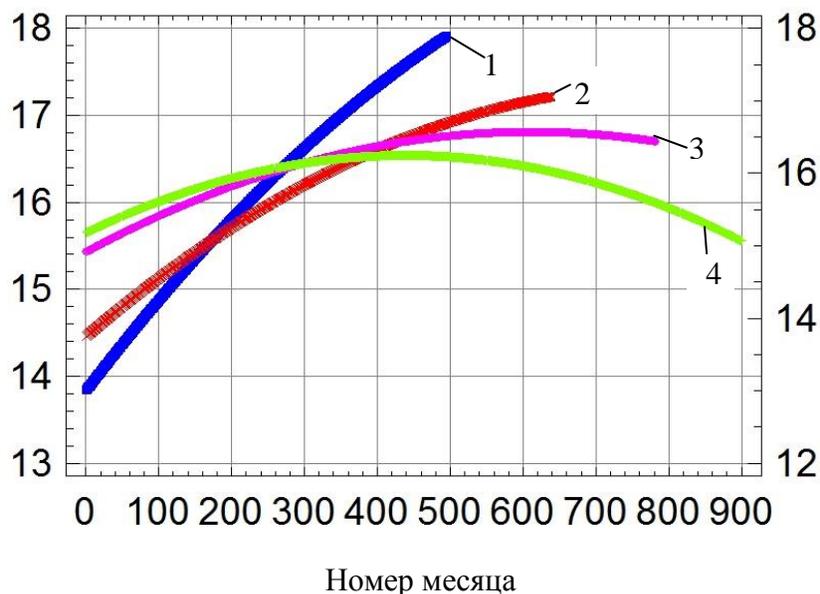


Рис. 2. Квадратические модели трендов sw для рядов длиной: 1 – 4 года (2016–2019); 2 – 5 лет (2016–2020); 3 – 6 лет (2016–2021); 4 – 7 лет (2016–2022)

Зависимость вида трендов sw от длины ряда проявляется в том, что чем продолжительнее ряд, тем более пологой оказывается возрастающая часть его тренда (см. рис. 2). При этом тренд шестилетнего ряда достигает максимума на 610-м месяце измерений (1 января 2021 г.), а у семилетнего ряда максимум наступает раньше, на 439-м месяце измерений (24 июля 2019 г.).

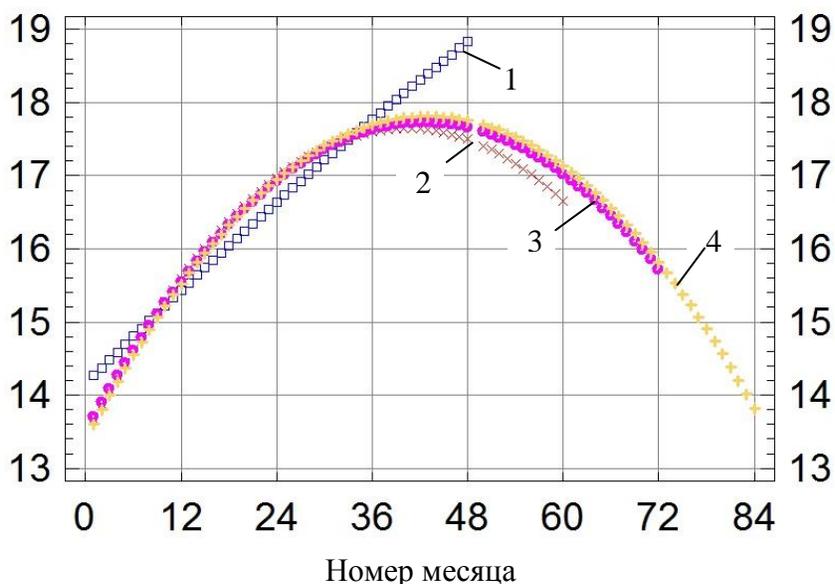


Рис. 3. Квадратические модели трендов $atcw$ для рядов длиной: 1 – 4 года; 2 – 5 лет; 3 – 6 лет; 4 – 7 лет

На начальном (примерно трехлетнем) отрезке линии трендов $atcsw$ шести- и семилетнего рядов совпадают при замедляющемся росте (см. рис. 3). Тренд пятилетнего ряда достигает максимума на 40-м месяце, а тренд шестилетнего – на 43-м. Пройдя точку своего максимума, линия пятилетнего тренда понижается быстрее линии шестилетнего. Нисходящая ветвь шестилетнего ряда совпадает с семилетним до самого конца.

Как уже отмечалось в [7], у самых коротких, четырехлетних, рядов тренды sw и $atcsw$ быстро возрастают почти линейно, что вызывает сомнение в их достаточной пригодности при оценке поведения электропроводности в 2016–2019 гг. Шести- и семилетние ряды ведут себя более спокойно и закономерно.

Для сопоставления поведения рядов показателя кислотности $ampH$ и электропроводности $atcsw$ осадков оказалось целесообразным построение кубического тренда $atcsw$, поскольку поведение кубического тренда $ampH$ подробно рассмотрено нами, например, в [8].

Уравнения кубических трендов $atcsw$ и $ampH$ для семилетнего ряда осадков имеют вид:

$$atcsw = 14,7595 + 0,0191426 \cdot n + 0,00306606 \cdot n^2 - 0,000042797 \cdot n^3;$$

$$ampH = 5,68193 + 0,00400086 \cdot n - 0,000314676 \cdot n^2 + 0,00000365684 \cdot n^3.$$

Сравнение кубических трендов $ampH$ и $atcsw$, показанных на рис. 4, демонстрирует обратную связь этих величин. Линейный коэффициент корреляции семилетних трендов составляет $-0,950643$, в то время как для шестилетних [7] корреляция слабее: ее коэффициент равен $-0,87164$. Это объясняется, на наш взгляд, тем, что при удлинении рядов их тренды распрямляются, становятся более пологими, то есть более похожими друг на друга, и корреляция растет.

Синхронность глобальных экстремумов противоположного знака, наблюдавшаяся у шестилетних рядов [7], оказалась непродолжительной и исчезла у семилетних в результате упомянутого распрямления их трендов.

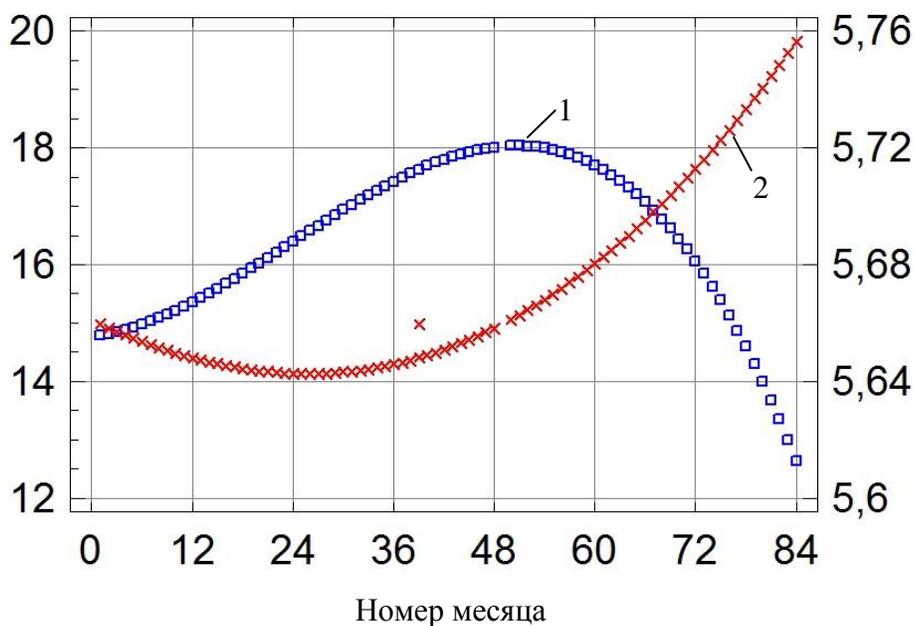


Рис. 4. Кубические тренды семилетних (2016–2022) рядов:
1 – $atcsw$; 2 – $ampH$

Удлинение ряда $atcw$ на один год (то есть до семи лет) привело к дальнейшему изменению формы кубической модели его тренда (рис. 5).

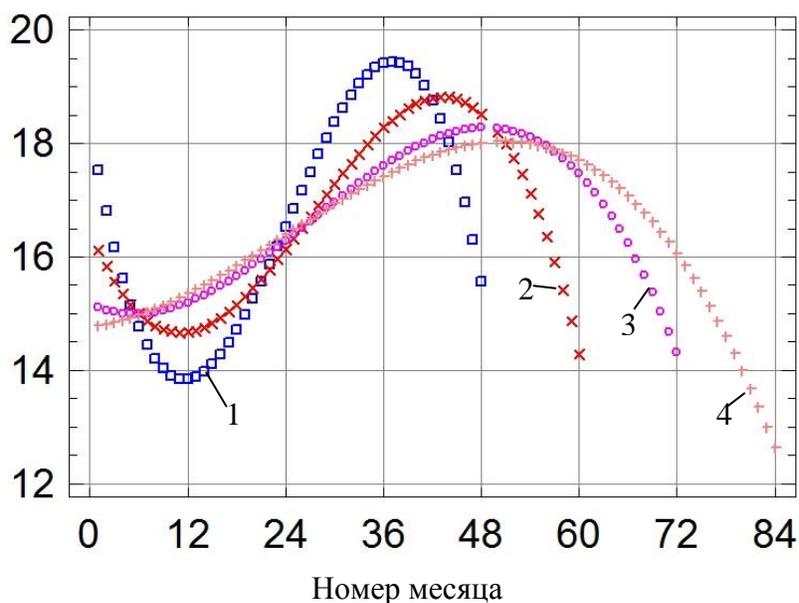


Рис. 5. Кубические тренды $atcw$ рядов длиной: 1 – 4 года; 2 – 5 лет; 3 – 6 лет; 4 – 7 лет

Максимум тренда четырехлетнего ряда (со значением 19,447) наступил в январе 2019 г., максимум тренда у пятилетнего (со значением 18,817) пришелся на июль 2019 г. Шестилетний ряд (со значением 8,281) достиг максимального значения тренда (18,290) в декабре 2019 г., а у семилетнего ряда (со значением 18,0934) максимум тренда наступил в марте 2020 г.). Отметим еще одну особенность: чем длиннее ряд, тем больше «отстает» (по времени) момент наступления максимума кубического тренда от окончания процесса наблюдений. В месяцах разница составляет 11, 17, 24 и 33 соответственно. Удлинение конечных нисходящих участков трендов происходит одновременно с уменьшением их наклона.

Сезонная декомпозиция шести- и семилетнего рядов $atcw$ позволила установить, что изменения, произошедшие с $atcw$ за последний год наблюдений, не имеют принципиального характера.

Тренд семилетнего ряда стал более «распластанным» во времени по сравнению с трендом шестилетнего ряда, а размах его несколько уменьшился.

Различия сравниваемых рядов обусловлены, как уже отмечалось при сравнении шести- и пятилетнего рядов [7], по нашему мнению, влиянием длины ряда на вид кубического тренда. Используемая кубическая модель дает предварительное (приближенное) представление о действительном поведении электропроводности осадков. Исходя из эволюции кубической модели за время наблюдений, можно предположить, что модель станет вполне пригодной лишь при дальнейшем удлинении ряда наблюдений за электропроводностью sw . Можно, в частности, ожидать, что при удлинении ряда наблюдений будут происходить «распластывание» тренда и уменьшение его размаха.

Сравнение циклических компонент шести- и семилетнего рядов $amcw$, полученных также в результате сезонной декомпозиции рядов (здесь не показано), выявляет, что общий характер поведения этих компонент весьма схож с тем, который наблюдался при сравнении пяти- и шестилетних рядов. Колебания (в сторону увеличения значений и в сторону уменьшения) происходят синхронно, размах колебаний незначителен. Значит, удлинение ряда $amcw$ не привело к существенному изменению периодичности циклов. Это указывает на стабильность факторов, определяющих циклическую компоненту ряда $amcw$ и ряда cw в целом.

Динамика удельной электропроводности $amcw$ внутри каждого года наблюдений оценивалась по сезонным компонентам временных рядов [5]. Период сезонных колебаний p принят равным числу месяцев в году, то есть 12. Оценкой сезонной компоненты служит \hat{s}_i – среднее отклонений $amcw$ от тренда \hat{tr}_i [3], то есть положено, что для среднемесячной удельной электропроводности

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

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

Годовой ход сезонных компонент (месячных индексов) обоих рядов рассмотрен в [7]. Сходный характер динамики индексов проявляется отчетливо. Разница состоит в некоторой сглаженности хода индексов более длинных рядов по сравнению с короткими, что соответствует общей тенденции сглаживания параметров временных рядов при их удлинении и проявляется наиболее ярко при сравнительно небольшой длине рядов.

Выводы:

1. Еще раз подтверждено существование обратной корреляционной связи удельной электропроводности осадков, выпадающих в Твери, с показателем кислотности pH при удлинении ряда наблюдений на один год (с шести лет до семи).

2. Представляется перспективной кубическая модель тренда среднемесячных значений удельной электропроводности атмосферных осадков при продолжительных наблюдениях.

3. Внутригодовая динамика удельной электропроводности при удлинении ряда наблюдений существенно не изменилась.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Качество воды в Центральной Азии. Общие и суммарные показатели качества вод [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://cawater-info.net/water_quality_in_ca/hydrochem1.htm (дата обращения: 14.04.2023).
2. Янченко Н.И. Особенности изменения величины pH и электропроводности снежного покрова в Братске // *Известия Томского политехнического университета. Химия и химические технологии*. 2014. Т. 325. № 3. С. 23–30.
3. 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.
4. Качановский Ф.В. Связь электропроводности осадков, выпадающих в Твери, с метеофакторами // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство, электротехника и химические технологии»*. 2020. № 3 (7). С. 69–76.

5. 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.
6. Качановский Ф.В. Анализ особенностей электропроводности осадков, выпавших в Твери в 2016–2020 гг. // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство, электротехника и химические технологии»*. 2021. № 2 (10). С. 47–55.
7. Качановский Ф.В. Что происходит с электропроводностью осадков, выпадающих в Твери, при удлинении ряда наблюдений // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство, электротехника и химические технологии»*. 2021. № 4 (12). С. 66–73.
8. Качановский Ф.В. О кислотности осадков, выпадающих в Твери // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство, электротехника и химические технологии»*. 2020. № 2 (6). С. 66–74.
9. Качановский Ф.В. Об электропроводности осадков, выпавших в Твери в 2016–2021 гг. // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2022. № 4 (16). С. 34–40.
10. Голицын А.Н. Инженерная геоэкология: учебник для студентов учреждения среднего профессионального образования. М.: Оникс, 2007. 202 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

КАЧАНОВСКИЙ Феликс Вячеславович – доцент кафедры «Гидравлика, теплотехника и гидропривод», ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: felix.kachanovsky@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Качановский Ф.В. Электропроводность осадков, выпавших в Твери в 2016–2022 гг. // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 2 (18). С. 36–43.

INFLUENCE OF METEOROLOGICAL CONDITIONS UPON THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF THE PRECIPITATION IN TVER DURING 2016–2022 YEARS

F.V. Kachanovsky

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. Analysis had made of the precipitation's electrical conductivity (atmospheric precipitation had fallen in Tver in 1916–2022 years) and factors of the influence on it. Time series models of the electrical conductivity were examined. Cubic model has considered as adequate.

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

REFERENCES

1. Water quality in Central Asia. General and summary indicators of water quality [Electronic resource]. – Access mode: http://cawater-info.net/water_quality_in_ca/hydrochem1.htm (date of access: 14.04.2023). (In Russian).
2. Yanchenko N.I. Features of the change in the pH and electrical conductivity of the snow cover in Bratsk. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Himiya i himicheskie tekhnologii*. 2014. Vol. 325. No. 3, pp. 23–30. (In Russian).
3. Kachanovsky F.V. Electrical conductivity of the precipitation in Tver. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i himicheskie tekhnologii»*. 2019. No. 3 (3), pp. 65–71. (In Russian).
4. Kachanovsky F.V. Connection of electrical conductivity of precipitation falling in Tver with weather factors. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i himicheskie tekhnologii»*. 2020. No. 3 (7), pp. 69–76. (In Russian).
5. Kachanovsky F.V. Electrical specific conductivity of the precipitation in Tver. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i himicheskie tekhnologii»*. 2020. No. 4 (8), pp. 89–97. (In Russian).
6. Kachanovsky F.V. Analysis of the electrical conductivity of precipitation in Tver in 2016–2020. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i himicheskie tekhnologii»*. 2021. No. 2 (10), pp. 47–55. (In Russian).
7. Kachanovsky F.V. What happens of a lengthening of time series for electrical conductivity of the precipitation in Tver. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i himicheskie tekhnologii»*. 2021. No. 4 (12), pp. 66–73. (In Russian).
8. Kachanovsky F.V. About the acidity of precipitation falling in Tver. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i himicheskie tekhnologii»*. 2020. No. 2 (6), pp. 66–74. (In Russian).
9. Kachanovsky F.V. About of the electrical conductivity of the precipitation in Tver during 1916–2021 years. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i himicheskie tekhnologii»*. 2022. No. 4 (16), pp. 34–40. (In Russian).
10. Golitsyn A.N. *Inzhenernaya geoekologiya* [Engineering geocology]. Moscow: Oniks, 2007. 202 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 A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: felix.kachanovscky@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Kachanovsky F.V. Influence of meteorological conditions upon the electrical conductivity of the precipitation in Tver during 2016–2022 years // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2023. No. 2 (18), pp. 36–43.