

**ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ FUZZY LOGIC ПРИ ОЦЕНКЕ
ВЛАГООБЕСПЕЧЕННОСТИ В СИСТЕМЕ РАСТЕНИЕ-ПОЧВА-ВОЗДУХ****Алексеев В.В., Максимов И.И., Семенов М.В., Мишин П.В., Терентьев А.Г.,
Медведев В.И., Зайцев П.В.**

Реферат. Принятие правильных решений в повседневной практической деятельности агро-технолога является важнейшей составляющей, определяющей условия роста и развития растений. Особенную важность оно принимает в условиях неполной (нечеткой) информации. Одним из перспективных направлений решения проблем прогнозирования и моделирования природных и корректируемых человеком явлений и процессов является нечеткая логика (fuzzy logic). Изучению вопросов прогнозирования погодных условий, для наименее затратного создания оптимальных условий роста и развития сельскохозяйственных растений посвящены работы многих отечественных и зарубежных ученых и, соответственно, имеются различные и иногда противоречивые точки зрения на определение прогнозных норм и сроков поливов. Полученные в большинстве исследований зависимости и расчетные формулы, описывающие связь объемов поступающей с осадками или поливом воды с процессами ее инфильтрации в почву во многих случаях специализированы для определенных почв в конкретных условиях и далеко не всегда переносятся от почвы к почве. В связи с этим, в статье рассмотрены вопросы моделирования частоты и интенсивности осадков по данным многолетних наблюдений, а также численных расчетов интенсивности впитывания воды в почву при естественных осадках и орошении. Такой подход позволяет планировать эрозионно-безопасные поливы, которые в сочетании с естественными осадками, обеспечивают благоприятный режим в системе растение-почва-воздух и соответственно получение высоких урожаев для рассматриваемых земель. Состояние почвы в различные моменты времени во многом определяет как, с одной стороны, долю впитываемой воды, так и, с другой стороны, долю стекающей воды. И если первая часть напрямую связана с влагообеспеченностью растений, то вторая непосредственно определяет опасность возникновения эрозионных процессов. На скорость впитывания воды в почву комплексное влияние оказывают такие факторы, как удельная поверхность, пористость почвы, ее начальная влажность, структурность и водопрочность агрегатов, корневая система и густота растений др.

Ключевые слова: нечеткая логика, влагообеспеченность, пористость, удельная поверхность, инфильтрация, поверхностное впитывание воды, сток, эрозия почвы.

Введение. Для моделирования и прогнозирования погодных условий (в нашем случае времени, частоты, продолжительности и интенсивности осадков) вполне перспективным направлением является использование законов нечеткой логики (fuzzy logic). Использование аппарата нечеткой системы связано с тем, что поставленная задача имеет неопределенность и неточность исходной информации. Процесс принятия решений в этом случае имеет многокритериальный и достаточно сложный характер. Неопределенность и неточность информации вытекает из обработки вышеперечисленных данных об осадках за 50-летний период. Использование кластерного анализа позволило разбить весь массив данных на 5-6 наиболее вероятных случаев. Внутри каждого кластера, согласно законам математической статистики, выявлены характерные кластеру сведения о времени, частоте, продолжительности и интенсивности осадков. То есть после анализа были определены их средние значения (диапазоны) и соответствующими вероятностями для каждого дождя в рассматриваемом кластере. Условно на нечеткие подмножества делятся интенсивности и продолжительности

осадков.

Поскольку интенсивности увлажнения и испарения воды из почвы зависят как от ее свойств, так и от внешних условий, то вполне могут быть использованы выводы о состоянии влаги в почве, полученные с помощью нечеткой логики. Факторы, определяющие испарение и скорость промачивания изучены недостаточно и поэтому при прогнозировании возникает ряд трудностей. Общих универсальных методов для описания испарения и увлажнения почвы в литературе не найдено, а имеющиеся модели ограничены применением только в определенных условиях из-за сделанных допущений.

Расход влаги из почвы условно можно разделить на два вида: производительный – потребление влаги растительным покровом и непроизводительный – испарение с поверхности почвы, инфильтрация, сток воды и т.п. После стока вод и инфильтрации наибольшая доля расхода приходится на испарение с поверхности почвы [1]. Почва при этом может иссушаться до глубины 20 см, а в засушливых районах 40 см и более. Кроме свойств почвы скорость испарения зависит от таких внешних

условий, как температура, скорость ветра, форма поверхности и растительный покров.

Испарение воды во многом зависит от температуры, которая определяет энергетику почвенной влаги. При рассмотрении испарения однако учтем дополнительные затраты энергии, связанных с тем, что в почве при уменьшении объема влаги величина поверхности конденсированной фазы увеличивается. Полученные в большинстве исследований отечественных и зарубежных ученых зависимости и расчетные формулы, описывающие процессы инфильтрации во многих случаях специализированы для определенных почв в конкретных условиях и далеко не всегда переносимы от почвы к почве.

Условия, материалы и методы исследований.

Реализуем известный механизм логического вывода. Рассмотрим, к примеру, продолжительность. В виду то, что для различных дождей в кластере продолжительность T разная и совершенно точно известно, что она ни разу не была меньше T_{\min} и никогда не превышала T_{\max} , то функция принадлежности операнда имеет следующий вид:

$$\mu D(x) := \max \left(\min \left(\frac{x - T_{\min}}{T - T_{\min}}, 1, \frac{T_{\max} - x}{T_{\max} - T} \right), 0 \right) \quad (1)$$

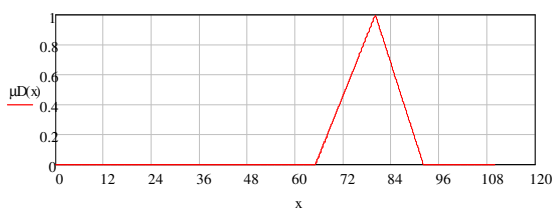


Рисунок 1 – График функции принадлежности для продолжительности (минуты) среднего «осеннего» дождя $T_{\min}=65, T=80, T_{\max}=92$

При рассмотрении интенсивности дождя функция принадлежности может выглядеть так (рисунок 2):

$$\mu A(x) := \max \left(\min \left(\frac{x - I_{\min}}{I_0 - I_{\min}}, 1, \frac{I_{\max} - x}{I_{\max} - I_1} \right), 0 \right) \quad (2)$$

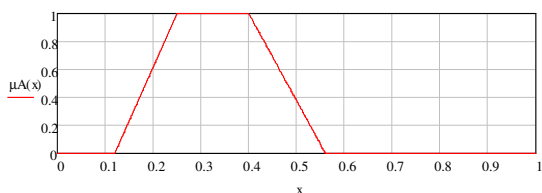


Рисунок 2 – График функции принадлежности $\mu A(x)$ для интенсивности (мм в минуту) среднего «осеннего» дождя $I_{\min}=0.12, I_0=0.25, I_1=0.40, I_{\max}=0.56$

Из рисунка 2 видно, что интенсивность изменяется в пределах 0.25 – 0.40, но никогда не было меньше 0.12 и никогда не было боль-

ше 0.56.

Аналогично, если речь идет о временном интервале между дождями, то функция принадлежности может иметь вид (рисунок 3):

$$\mu A(x) := \max \left(\min \left(\frac{x - 120}{128 - 120}, 1, \max \left(1 - \frac{x - 145}{150 - 145}, 1 - \frac{x - 115}{180 - 115} \right) \right), 0 \right) \quad (3)$$

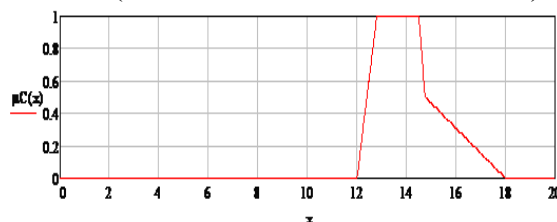


Рисунок 3 – Временной интервал между дождями (часы)

Описав математически нечеткие утверждения, мы задали полную информацию о поступающей в почву влаге.

Впитывание воды в почву является сложным процессом. Поток влаги определяется как объем воды, впитавшийся в почву за единицу времени через единицу площади: $q = Q/St$. На скорость впитывания воды в почву комплексное влияние оказывают такие факторы, как удельная поверхность, пористость почвы, ее начальная влажность, структурность и водопрочность агрегатов, корневая система и др.

Определение коэффициента фильтрации часто проводят с помощью вертикальных почвенных монолитов. Измеряют объем впитавшейся воды, поддерживая постоянной толщину слоя воды на поверхности монолита. Различают безнапорную фильтрацию (с единичным гидравлическим градиентом) и напорную (градиент превосходит единицу).

Убывающую со временем интенсивность впитывания описывает уравнение А.Н. Костякова [1, 4]:

$$K_t = K_0 t^{-\alpha}, \quad (4)$$

где K_t – интенсивность впитывания в момент t , K_0 – интенсивность в начале впитывания, α – коэффициент.

Аверьяновым С.Ф. и др. формула (4) была усовершенствована путем добавления константы равной коэффициенту фильтрации K_f , поскольку, через определенное время, после заполнения пор водой, поток стабилизируется и начинается фильтрация воды через почву, т.е. $K_t = K_0 + K_f t^{-\alpha}$. Однако такой тип модели не является стандартным и его линеаризация для статистической обработки нетривиальна, поэтому применение электронных таблиц с целью получения интересующих численных значений затруднено.

В ряде работ в формулу (4) добавляется множитель e^{bi} (b – эмпирический множитель, i

- уклон).

Не впитывающаяся вода обуславливает угрозу образования эрозионно-опасного стока. Поэтому многими исследователями для улучшения впитывания были предложены всевозможные решения: дискретный полив с регулированием интенсивности; использование кратковременного полива за определенное время до основного с целью увеличения коэффициента влагопроводности (предварительное смачивание); обмагничивание воды; механическое рыхление почвы и ее шеление; повышение структурности почвы с использованием полимерных материалов.

Как упоминалось ранее уравнение А.Н. Костякова имеет степенной вид $K_t = K_0 t^{-\alpha}$, а, значит, входит в набор стандартных функций современных электронных таблиц (степенная), по которым получают уравнения нелинейной регрессии. Поэтому поиск численных значений коэффициентов модели K_0 , и α не представляет трудностей при статистической обработке данных. Однако более точной является формула, предложенная Аверьяновым С.Ф. [4] $K_t = K_\phi + K_0 t^{-\alpha}$ (K_ϕ - коэффициент фильтрации). Она получена из формулы А.Н. Костякова путем добавления константы равной коэффициенту фильтрации. Это связано с тем, что через некоторое время, после заполнения пор водой начинается фильтрация воды через почву.

Однако с позиции математической статистики тип модели, предложенной Аверьяно-

вым С.Ф., не является стандартным и применение электронных таблиц для его обработки затруднено. При необходимости получения регрессионных зависимостей интенсивности впитывания от пористости и удельной поверхности почвы имеется следующее решение. В работе [1,4] для вычисления коэффициента влагопроводности получена формула:

$$K = \frac{\pi^2}{\Omega_0 \eta S^2} \cdot \frac{\lambda \Pi_0^\alpha}{1 - \Pi_0} \left[1 - \left(1 - \frac{w}{\Pi_0} \right)^2 \right], \quad (5)$$

где η - вязкость воды, Па с; S - площадь сечения образца почвы, м², через которое протекает газ; α, λ - постоянные зависящие от вида трехмерной модели, W_0 - объемная удельная поверхность, м²/м³; w - объемная влажность, м³/м³, Π_0 - пористость, в долях.

Формула справедлива для случаев, когда вода протекает через частично заполненную водой почву. Уравнение (5) показывает зависимость между коэффициентом влагопроводности и влажностью в явном виде и дает возможность учитывать свойства почвы, поскольку оно зависит как от пористости, так и удельной поверхности твердой фазы почвы.

Анализ и обсуждение результатов исследований. При использовании приведенной формулы вычисления коэффициента влагопроводности (5), для величины ($K - K_\phi$) зависимость приводится к статистически легко обрабатываемому степенному виду, что позволяет определять численные значения. Испол-

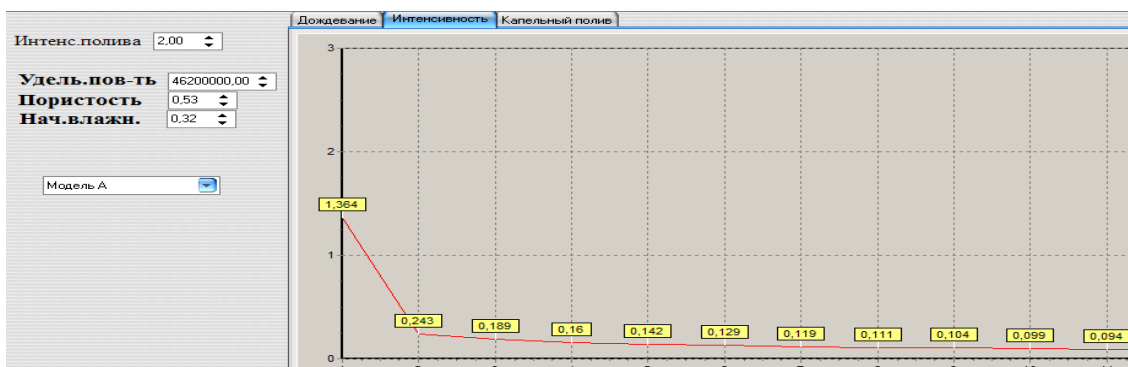


Рисунок 4 – Работа программного средства по расчету интенсивности впитывания

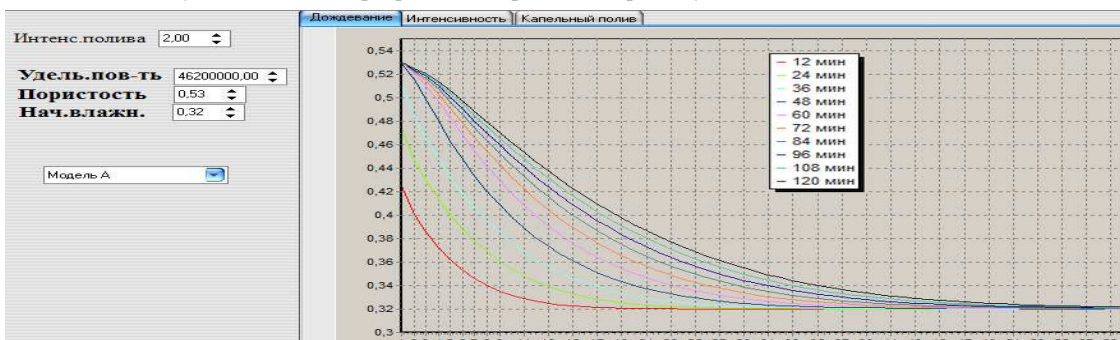


Рисунок 5 – Работа программного средства по расчету профилей увлажнения при дождевании и капельном поливе

Задача определения профиля увлажнения при дождевании является одномерной, поэтому рассчитывался послойный (50 слоев) перенос влаги с толщиной слоя $\Delta h=5$ мм (рисунок 5). При вычислении разности потенциалов почвенной влаги в слоях добавлялся гравитационный потенциал $g\Delta h$.

Реализация программного средства расчета профиля увлажнения осуществлена заданием объема влаги, поступающей в верхний слой за единицу времени, массивов значений пористости, удельной поверхности, начальной влажности для каждого слоя, по которым вычислялись коэффициенты влагопроводности и давления почвенной влаги. По формуле Дарси рассчитывались объемы влаги, перетекшей из слоя в слой. Число циклов перерасчета примерно соответствует времени прохождения по участку дождевальной машины.

Выводы. Разработанные программные средства по расчету профилей увлажнения и интенсивности впитывания могут использовать данные о влажности в почве, времени и интенсивности осадков, полученные с помощью нечеткой логики. Проведенное сравнение полученных по формулам значений с экспериментальными данными подтвердило статистическую значимость и, следовательно, оправданность предлагаемого метода расчета для описания условий влагообеспеченности в почвах. Благодаря тому, что в формулах учитываются физические и гидрофизические свойства конкретной почвы на конкретном участке их использование экономически эффективно при проведении агрономических мероприятий, а также для численного моделирования процессов впитывания воды в почву при дождевании и капельном орошении.

Литература

1. Алексеев, В.В. Исследование профилей увлажнения почвы с уплотненным слоем при дождевании и поверхностном поливе / В.В. Алексеев // *Природообустройство*, 2016. № 4. С. 92-96.
2. Алексеев, В.В. Уточненная оценка уплотненного состояния почв / В.В. Алексеев // *Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова* № 5, Саратов, 2013. С. 49-51.
3. Алексеев, В.В. Использование последовательных измерений коэффициента фильтрации для оценки уплотненного состояния почв / В.В. Алексеев // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2013. № 4 (102). С. 088-092.
4. Алексеев В.В., Максимов И.И. Гидрофизика почв в мелиорации: Монография. Чебоксары: «Новое время», 2017. 280 с. ISBN 978-5-906983-38-1.
5. Амиров М.Ф. Агротехнологии технических культур / Амиров М.Ф., Валеев И.Р., Валиев А.Р. и др. // В книге: Система земледелия Республики Татарстан. В 3-х частях. Казань, 2014. С. 178-250.
6. Васильев, С.А. Определение эквивалентной шероховатости стокоформирующей поверхности для оценки противоэрозионных мероприятий на склоновых землях / С.А. Васильев, И.И. Максимов, В.В. Алексеев // *Мелиорация и водное хозяйство*. 2014. № 4. С. 32-34.
7. Максимов, И.И. Оценка эффективности функционирования системы машина-почва-растение / И.И. Максимов, В.И. Максимов, А.Н. Михайлов, В.В. Алексеев // *Тракторы и сельхозмашины*. 2013. № 11. С. 28-34.
8. Мяло В.В., Демчук Е.В., Союнов А.С., Голованов Д.А. Совершенствование орудий для влагосберегающей обработки почвы // *Достижения науки и техники АПК*. – 2015. – №1. – С. 52-54.
9. Сысуев, В.А. Получение основной гидрофизической характеристики почв на основе трехмерных моделей / В.А. Сысуев, И.И. Максимов, В.В. Алексеев, В.И. Максимов // *Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук* № 5, 2013. С. 63-66.
10. Сысуев, В.А. Водосборная площадь малых рек как объект антропогенного агроландшафта (на примере реки Цивиль) / Сысуев В.А., Максимов И.И., Максимов В.И., Алексеев В.В. // *Аграрная наука Северо-Востока*. 2013. № 5 (36). С. 59-65.
11. Alekseev, V.V., & Maksimov, I.I. (2013) Aerodynamic method for obtaining the soil water retention curve. *Eurasian Soil Science*, Vol. 46, No. 7, 751–757. ISSN 1064 2293
12. Sysuev, V.A., Maksimov, I.I., Alekseev, V.V., & Maksimov, V.I. (2013). Soil Water Retention Curves Based on Idealized Models. *Russian Agricultural Sciences*, Vol. 39, No. 5–6, 522–525. ISSN 1068 3674
13. Maksimov, I.I., Maksimov, V.I., Vasil'ev, S.A., & Alekseev V.V. (2016) Simulation of channel development on the surface of agrolandscapes on slopes. *Eurasian Soil Science*, 49. № 4. 475-480.

Сведения об авторах:

Алексеев Виктор Васильевич – доктор технических наук, доцент
 Чебоксарский кооперативный институт РУК, г. Чебоксары, Россия
 Максимов Иван Иванович – доктор технических наук, профессор,
 Семенов Михаил Валерьевич – магистрант кафедры транспортно-технологических машин и комплексов
 Мишин Петр Владимирович – доктор технических наук, профессор
 Терентьев Алексей Григорьевич – доктор физико-математических наук, профессор,
 Медведев Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор,
 Зайцев Петр Владимирович, доктор технических наук, профессор,
 ФГБОУ ВО «Чувашская государственная сельскохозяйственная академия», г. Чебоксары, Россия.

APPLICATION OF FUZZY LOGIC ELEMENTS UNDER THE EVALUATION OF WATER-SAFETY IN THE PLANT-SOIL-AIR SYSTEM

Alekseev V.V., Maksimov I.I., Semenov M.V., Mishin P.V., Terentev A.G., Medvedev V.I., Zaytsev P.V.

Abstract. Making the right decisions in the everyday practical activities of the agrotechnologist is the most important component determining the conditions for the growth and development of plants. It takes special importance in the conditions of incomplete (fuzzy) information. One of the perspective directions of solving problems of forecasting and modeling natural and human-corrected phenomena and processes is fuzzy logic. Studies of weather forecasting and the least costly creation of optimal conditions for the growth and development of agricultural plants are devoted to the work of many domestic and foreign scientists and, accordingly, there are various and sometimes contradictory points of view on the definition of predicted norms and the timing of irrigation. The relationships obtained in most of the studies and the calculation formulas describing the relationship between the volumes of water entering the sediments and watering with the processes of its infiltration into the soil are in many cases specialized for certain soils under specific conditions and are not always portable from soil to soil. In this regard, the paper discusses the modeling of the frequency and intensity of precipitation from long-term observations, as well as numerical calculations of the intensity of water absorption into the soil under natural precipitation and irrigation. This approach allows planning erosion-safe irrigation, which, in combination with natural precipitation, provides a favorable regime in the plant-soil-air system and, accordingly, obtaining high yields for the land under consideration. The state of the soil at different times determines in many respects how, on the one hand, the proportion of soaking water, and, on the other hand, the proportion of running water. And if the first part is directly connected with the moisture supply of plants, the second directly determines the danger of erosion processes. The rate of water absorption into the soil is influenced by factors such as specific surface area, soil porosity, initial humidity, structural and water resistance of aggregates, root system and plant density, etc.

Key words: fuzzy logic, moisture supply, porosity, specific surface, filtration, surface water absorption, runoff, soil erosion.

References

1. Alekseev V.V. Investigation of humidification profiles of soil with a dense layer during sprinkling and surface watering. [Issledovanie profilya uvlazhneniya pochvy s uplotnennym sloem pri dozhdevanii i poverkhnostnom polive / V.V. Alekseyev // *Prirodoobustroystvo. - Nature Engineering*. 2016. № 4. S. 92-96.
2. Alekseev V.V. Refined assessment of compacted soil condition Utochnennaya otsenka uplotnennogo sostoyaniya pochv / V.V. Alekseyev // *Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N.I. Vavilova. -The Herald of Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov*. №5, Saratov, 2013. - P. 49-51.
3. Alekseev V.V. Use of successive measurements of the filtration factor to evaluate the compacted state of soils Ispol'zovaniye posledovatel'nykh izmereniy koeffitsiyenta fil'tratsii dlya otsenki uplotnennogo sostoyaniya pochv / V.V. Alekseyev // *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. - The Herald of Altai State Agrarian University*. 2013. № 4 (102). P. 088-092.
4. Alekseev V.V., Maksimov I.I. *Gidrofizika pochv v melioratsii: Monografiya*. [Hydrophysics of soil in land improvement: Monograph]. - Cheboksary: "Novoe vremya", 2017. - P. 280. ISBN 978-5-906983-38-1.
5. Amirov M.F. Agrotechnologies of commercial crops [Agrotehnologii tehnikeskikh kultur] / Amirov M.F., Valeev I.R., Valiyev A.R., etc.//In the book: System of agriculture of the Republic of Tatarstan. [Sistema zemledeliya Respubliki Tatarstan]. - In 3 parts. Kazan, 2014. Page 178-250.
6. Vasilev S.A. Determination of the equivalent roughness of the stokoforming surface for the evaluation of erosion control measures on slope lands. [Opredelenie ekvivalentnoy sherokhovatosti stokoformiruyushey poverkhnosti dlya otsenki protiverozionnykh meropriyatiy na sklonovykh zemlyakh]. / S.A. Vasilev, I.I. Maksimov, V.V. Alekseev // *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo. - Melioration and water management*. 2014. № 4. - P. 32-34.
7. Maksimov I.I. Evaluation of the effectiveness of the machine-soil-plant system. [Otsenka effektivnosti funktsionirovaniya sistemy mashina-pochva-rasteniye]. / I.I. Maksimov, V.I. Maksimov, A.N. Mikhaylov, V.V. Alekseev // *Traktory i selkhoz mashiny. - Tractors and agricultural machinery*. 2013. № 11. P. 28-34.
8. Myalo V.V., Demchuk E.V., Soyunov A.S., Golovanov D.A. Improvement of tools for water-saving cultivation of soil [Sovershenstvovanie orudiy dlya vlagosberegayushey obrabotki pochvy] // *Dostizheniya nauki i tekhniki apk. - Advances in -agriculture science and technology*. - 2015. - №1. - C. 52-54.
9. Sysuev V.A. Obtaining the basic hydrophysical characteristics of soils on the basis of three-dimensional models. [Poluchenie osnovnoy gidrofizicheskoy kharakteristiki pochv na osnove trekhmernykh modeley]. / V.A. Sysuev, I.I. Maksimov, V.V. Alekseev, V.I. Maksimov // *Doklady Rossiyskoy akademii sel'skokhozyaystvennykh nauk. - Artilces of Russian Academy of Agriculture*. № 5, 2013. - P. 63-66.
10. Sysuev V.A. The catchment area of small rivers as an object of anthropogenic agrolandscape (by the example of Tsivil river). [Vodosbornaya ploshad mal'nykh rek kak obekt antropogennogo agrolandshafta (na primere reki Tsivil)]. / Sysuev V.A., Maksimov I.I., Maksimov V.I., Alekseev V.V. // *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka. - Agrarian science of the Euro-North-East*. 2013. № 5 (36). P. 59-65.
11. Alekseev, V.V., & Maksimov, I.I. (2013) Aerodynamic method for obtaining the soil water retention curve. *Eurasian Soil Science*, Vol. 46, No. 7, 751-757. ISSN 1064 2293
12. Sysuev, V.A., Maksimov, I.I., Alekseev, V.V., & Maksimov, V.I. (2013). Soil Water Retention Curves Based on Idealized Models. *Russian Agricultural Sciences*, Vol. 39, No. 5-6, 522-525. ISSN 1068 3674
13. Maksimov, I.I., Maksimov, V.I., Vasil'ev, S.A., & Alekseev V.V. (2016) Simulation of channel development on the surface of agrolandscapes on slopes. *Eurasian Soil Science*, 49. № 4. 475-480.

Authors:

Alekseev Victor Vasilievich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Eboksary Cooperative Institute of the Republic of Karelia, Cheboksary, Russia
 Maksimov Ivan Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor,
 Semenov Mikhail Valerevich - master student of the department of transport-technological machines and complexes
 Mishin Petr Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Professor
 Terentyev Alexey Grigoryevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,
 Medvedev Vladimir Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor,
 Zaytsev Petr Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Professor,
 FGBOU VO "Chuvash State Agricultural Academy", Cheboksary, Russia.