

В.И. Ольгаренко, член-корреспондент РАН, профессор, заслуженный деятель науки РФ
Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А.К. Кортунова –
филиал Донского государственного аграрного университета
РФ, 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Пушкинская, 111

Г.В. Ольгаренко, член-корреспондент РАН, профессор
Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга»
РФ, 140483, Московская обл., Коломенский гор. окр., пос. Радужный, 38

И.В. Ольгаренко, доктор технических наук, доцент
Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А.К. Кортунова –
филиал Донского государственного аграрного университета

В.И. Ольгаренко, кандидат технических наук
Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации
РФ, 346421, Ростовская обл., г. Новочеркасск, Баклановский пр-т, 190
E-mail: olgarenko@mail.ru

УДК 631.675

DOI:10.30850/vrsn/2022/1/42-46

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭВАПОТРАНСПИРАЦИИ С УЧЕТОМ ВЕРОЯТНОСТНОГО ХАРАКТЕРА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ И ВОДНОБАЛАНСОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Цель работы – найти и определить точность модели расчета эвапотранспирации с учетом вероятностного характера гидрометеорологической и воднобалансовой информации орошаемого агроландшафта. Многолетними экспериментальными исследованиями на оросительных системах Юга России для различных почвенно-климатических зон орошения установлены эмпирические зависимости эвапотранспирации сельскохозяйственных культур и фактической влагообеспеченности корнеобитаемого слоя почвы для соответствующих фаз развития растений с последующим сравнением полученных результатов с данными потенциальной эвапотранспирации по метеостанциям. Вычисленные абсолютные значения коэффициентов корреляции между сопоставляемыми значениями эвапотранспирации и составляющими характеристиками водного баланса изменяются в широком диапазоне от 0,34 до 0,98, а эмпирические зависимости в общем виде описываются нелинейными математическими уравнениями. Значительное повышение точности определения фактических величин эвапотранспирации сельскохозяйственных культур для конкретных почвенно-климатических зон орошения – главный фактор по установлению как фактической динамики изменчивости влагозапасов в расчетном слое почвы, так и достоверных поливных и оросительных норм в течение всего периода. Установлено, что методика определения изучаемых параметров по уравнениям: А.М. Алпатьева дает существенные ошибки; С.И. Харченко – в целом удовлетворительная, однако показывает недопустимые отклонения в частных решениях; искомой модели – хорошая, с допустимыми отклонениями расчетных величин от их фактических значений.

Ключевые слова: эвапотранспирация, потенциальная эвапотранспирация, влагозапасы, статистика, методика, точность, Юг России.

V.I. Ol'garenko, Corresponding member of the RAS, Professor, Honoured Scientist of the Russian Federation
Novocherkassk Engineering and Land Reclamation Institute – branch of the Don State Agrarian University
RF, 346428, Rostovskaya obl., g. Novocherkassk, ul. Pushkinskaya, 111

G.V. Ol'garenko, Corresponding member of the RAS, Professor
Federal State Budget Scientific-Research Establishment «All-Russia Scientific Research Institute for Irrigation and Farming Water Supply Systems «RADUGA»
RF, 140483, Moskovskaya obl., Kolomenskij gor. okr., pos. Raduzhnyj, 38

I.V. Ol'garenko, Grand PhD in Engineering sciences, Docent
Novocherkassk Engineering and Land Reclamation Institute – branch of the Don State Agrarian University

V.I. Ol'garenko, PhD in Engineering sciences
Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems
RF, 346421, Rostovskaya obl., g. Novocherkassk, Baklanovskij pr-t, 190
E-mail: olgarenko@mail.ru

ACCURACY EVALUATION OF EVAPOTRANSPIRATION DETERMINING TAKING INTO ACCOUNT THE PROBABILISTIC NATURE OF HYDROMETEOROLOGICAL AND WATER BALANCE INFORMATION

The purpose of the scientific article is to develop and determine the accuracy of the model for calculating evapotranspiration, taking into account the probabilistic nature of the hydrometeorological and water balance information of the irrigated agricultural landscape. Empirical dependences of various crops evapotranspiration and the actual moisture supply of the soil root layer have been determined for the corresponding phases of plant development by long-term experimental studies on the irrigation systems of the South Russia region for various soil and climatic irrigation zones, followed by comparison of the data obtained with the potential evapotranspiration data at the corresponding meteorological stations. Data analysis shows that the calculated absolute data values of the correlation coefficients between the compared values of the studied parameters vary in a wide range from 0.34 to 0.98, and obtaining empirical dependencies is generally described by nonlinear mathematical equations. Thus, it was found that the method for determining the parameters under study

according to A.M. Alpatov equation gives significant errors; according to S.I. Kharchenko equation – is generally satisfactory, but allows unacceptable deviations in particular solutions; according to model – a good one, with allowable deviations of the calculated values from their actual values.

Key words: *evapotranspiration, potential evapotranspiration, moisture reserves, statistics, methodology, accuracy, South of Russia.*

Информационно-аналитический анализ специальных литературных материалов как в российской [1–3], так и зарубежной мелиоративной практике [5] указывает на наличие разных эмпирических зависимостей определения эвапотранспирации сельскохозяйственных культур, которые очень важны в расходной части уравнения водного баланса орошаемого поля. Величина эвапотранспирации зависит от природных факторов (водно-физические и химические свойства почвы, фактические гидрометеорологические условия, влажность почвы, гидрологические характеристики участков соответствующих зон орошения) и физиологических свойств растений, прогрессивных технологий их возделывания с учетом мелиоративного профиля. Чтобы определить объемы подачи воды в хозяйства различных форм собственности, и расположенные в зонах обслуживания федеральных оросительных систем, необходимо установить с достаточной степенью точности величины эвапотранспирации сельскохозяйственных культур для соответствующих природно-климатических зон.

Для решения данной проблемы необходимо, во-первых, теоретически обосновать и вывести обобщенные эмпирические зависимости по определению величины эвапотранспирации на основе методологического подхода с учетом вероятностного характера динамики фактических метеорологических параметров и тепловлагообеспеченности в расчетном слое почвы, обеспечивающих значительное повышение точности величины эвапотранспирации. Во-вторых, следует провести статистический анализ и установить закономерности за продолжительное время между фактическими значениями эвапотранспирации и гидрометеорологическими параметрами на экспериментальных участках различных природно-климатических зон орошения с соответствующими вышеуказанными величинами, полученными на метеорологических и воднобалансовых станциях, в зоне обслуживания которых располагаются опытные участки.

Данный методологический подход обеспечивает наиболее рациональное и эффективное использование водных ресурсов, повышает точность, надежность и реализацию внутрихозяйственных и системных планов водопользования, а также важен при диспетчерском управлении водораспределением по системе оросительных каналов.

Цель работы – найти и определить точность модели расчета эвапотранспирации с учетом вероятностного характера гидрометеорологической и воднобалансовой информации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Анализ результатов многолетних исследований [4] по определению фактической величины эвапотранспирации сельскохозяйственных культур

на опытных орошаемых участках различных почвенно-климатических зон Юга России, в том числе Ростовской области, на основе нового методического подхода, позволил установить фактические значения эвапотранспирации, потенциальной эвапотранспирации, и элементов водного баланса орошаемого поля. Значения для условий Ростовской области были сопоставлены с данными, полученными на соответствующих метеостанциях за тридцатилетний период и установлена их взаимосвязь на основании рассчитанных коэффициентов корреляции с последующим определением статистических характеристик количественной изменчивости для каждого показателя.

Выявлена степень влияния каждого гидрометеорологического фактора на величину эвапотранспирации и других изучаемых параметров, полученных на опытных участках различных почвенно-климатических зон орошения, степень точности которой определяется абсолютным значением коэффициента корреляции. Например: «эвапотранспирация – потенциальная эвапотранспирация», $r = 0,96$ (надежная и точная связь); «урожайность сельскохозяйственных культур – эвапотранспирация» и «потенциальная эвапотранспирация», соответственно, $r = 0,86$ и $r = 0,76$ (хорошая взаимосвязь и достаточная точность); «урожайность – оросительная норма», $r = 0,51$ (очень слабая взаимосвязь и недостаточная точность).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальными исследованиями установлены эмпирические зависимости эвапотранспирации сельскохозяйственных культур от фактической влагообеспеченности корнеобитаемого слоя почвы по фазам развития растений с последующим сравнением в относительных координатах полученных значений эвапотранспирации с величинами потенциальной эвапотранспирации, определяемыми по данным метеостанций с учетом фаз развития растений (рис. 1), которые описываются уравнениями параболы:

$$\frac{ET}{E_0} = a_0 + a_1 \cdot W_0 + a_2 \cdot W_0^2, \quad (1)$$

где E_0 – потенциальная эвапотранспирация по данным метеостанции, мм; W_0 – относительные

влагозапасы: $W_0 = \left(\frac{W_H + W_K}{2 \cdot W_{HB}} \right)$; W_H , W_K , W_{HB} –

влагозапасы, соответственно, начальные, конечные и при влажности, наименьшей влагоемкости (НВ), мм; a , a_1 и a_2 – эмпирические коэффициенты.

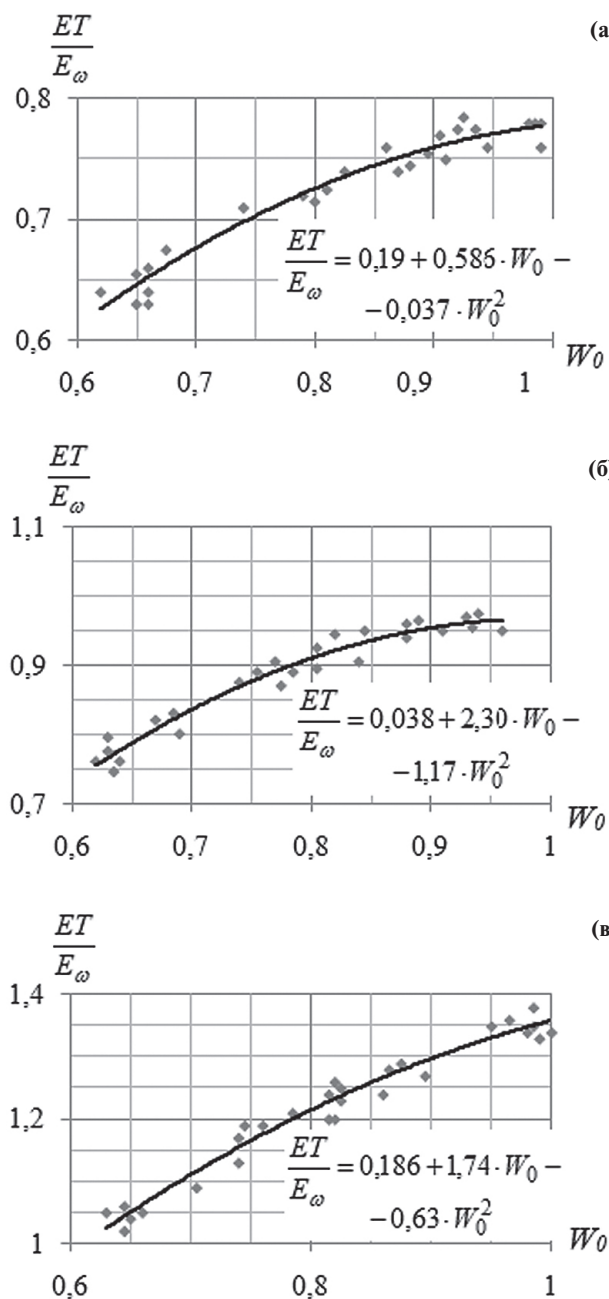


Рис. 1. Эмпирические зависимости эвапотранспирации люцерны от продуктивных влагозапасов: а – отрастание ($r = 0,90$), б – бутонизация ($r = 0,92$), в – начало цветения ($r = 0,99$).

Для расширения ареала применения разработанного методологического подхода по определению фактических значений эвапотранспирации сельскохозяйственных культур на основе данных наблюдений за гидрометеорологическими параметрами теоретически разработана и обоснована методика расчета неизвестных величин в уравнении водного баланса орошаемого участка. Сущность ее заключается в нахождении искомых величин: фактические значения эвапотранспирации соответствующей сельскохозяйственной культуры и конечные влагозапасы в расчетном слое почвы.

Применяем способ совместного решения уравнения водного баланса орошаемого поля (2) и фак-

тически полученной обобщенной эмпирической зависимости (1):

$$ET = W_H - W_K + P + M + V_{gr} - V_{sp} - V_u, \quad (2)$$

где P – эффективные осадки, мм; M , V_{gr} , V_{sp} , V_u – соответственно величины оросительной нормы, подпитки грунтовыми водами, поверхностного стока, инфильтрации, мм.

Преобразовав уравнения (1) и (2), получаем:

$$\left(\frac{a_2}{4 \cdot W_{HB}} \right) \cdot W_K^2 + \left(\frac{a_1}{2 \cdot W_{HB}} + \frac{a_2}{2 \cdot W_{HB}^2} + \frac{1}{E_\omega} \right) \cdot W_K + a_0 + \frac{a_1 \cdot W_H}{2 \cdot W_{HB}} + \frac{a_2 \cdot W_H^2}{4 \cdot W_{HB}^2} - \frac{W_H + P + M + V_{gr} - V_{sp} - V_u}{E_\omega} = 0 \quad (3)$$

Обозначив известную величину при неизвестном в первой степени и известную при неизвестной величине во второй как коэффициенты A_1 , A_2 и A_3 , выводим квадратное уравнение, определяющее величину конечных влагозапасов в расчетном слое почвы:

$$A_1 = \frac{a_2}{4 \cdot W_{HB}}, \quad (4)$$

$$A_2 = \frac{a_1}{2 \cdot W_{HB}} + \frac{a_2}{2 \cdot W_{HB}^2} + \frac{1}{E_\omega}, \quad (5)$$

$$A_3 = a_0 + \frac{a_1 \cdot W_H}{2 \cdot W_{HB}} + \frac{a_2 \cdot W_H^2}{4 \cdot W_{HB}^2} - \frac{W_H + P + M + V_{gr} - V_{sp} - V_u}{E_\omega}, \quad (6)$$

$$A_1 \cdot W_K^2 + A_2 \cdot W_K + A_3 = 0. \quad (7)$$

где A_1 , A_2 , A_3 – коэффициенты перехода, необходимые для вывода квадратного уравнения.

Для нахождения фактических значений эвапотранспирации сельскохозяйственных культур проведены преобразования:

$$W_K = W_H + P + M + V_{gr} - V_{sp} - V_u - ET, \quad (8)$$

$$\frac{ET}{E_\omega} = a_0 + a_1 \cdot \left(\frac{2 \cdot W_H + P + M + V_{gr} - V_{sp} - V_u - ET}{2 \cdot W_{HB}} \right) + a_2 \cdot \left(\frac{2 \cdot W_H + P + M + V_{gr} - V_{sp} - V_u - ET}{2 \cdot W_{HB}} \right)^2, \quad (9)$$

$$\left(\frac{1}{E_{\omega}} + \frac{\alpha_1}{2 \cdot W_{HB}} - \frac{\alpha_2 \cdot (2 \cdot W_H - 2 \cdot P - 2 \cdot M - 2 \cdot V_{gr} + 2 \cdot V_u + 2 \cdot V_{sp})}{4 \cdot W_{HB}^2} \right) \cdot ET -$$

$$\left(- \frac{\alpha_2}{4 \cdot W_{HB}^2} \right) \cdot ET^2 - \alpha_0 - \frac{a_1 \cdot (2 \cdot W_H + P + M + V_{gr} - V_{sp} - V_u)}{2 \cdot W_{HB}} -$$

$$a_2 \cdot \left(\frac{4 \cdot W_H^2 + 4 \cdot W_H \cdot (P + M + V_{gr} - V_{sp} - V_u) + P^2 + 2 \cdot P \cdot (M + V_{gr} - V_{sp} - V_u) + M^2 + 2 \cdot M \cdot (V_{gr} - V_{sp} - V_u) + V_{gr}^2 + 2 \cdot V_{gr} \cdot (-V_{sp} - V_u) + V_{sp}^2 + 2 \cdot V_{gr} \cdot V_u + V_u^2 + 2 \cdot V_u \cdot (-V_{sp} - V_u)}{4 \cdot W_{HB}^2} \right) = 0 \quad (10)$$

Обозначим:

$$A'_1 = - \frac{\alpha_2}{4 \cdot W_{HB}^2}, \quad (11)$$

$$A'_2 = \frac{1}{E_{\omega}} + \frac{\alpha_1}{2 \cdot W_{HB}} - \frac{\alpha_2 \cdot (2 \cdot W_H - 2 \cdot P - 2 \cdot M - 2 \cdot V_{gr} + 2 \cdot V_u + 2 \cdot V_{sp})}{4 \cdot W_{HB}^2}, \quad (12)$$

$$A'_3 = - \alpha_0 - \frac{a_1 \cdot (2 \cdot W_H + P + M + V_{gr} - V_{sp} - V_u)}{2 \cdot W_{HB}} -$$

$$a_2 \cdot \left(\frac{4 \cdot W_H^2 + 4 \cdot W_H \cdot (P + M + V_{gr} - V_{sp} - V_u) + P^2 + 2 \cdot P \cdot (M + V_{gr} - V_{sp} - V_u) + M^2 + 2 \cdot M \cdot (V_{gr} - V_{sp} - V_u) + V_{gr}^2 + 2 \cdot V_{gr} \cdot (-V_{sp} - V_u) + V_{sp}^2 + 2 \cdot V_{gr} \cdot V_u + V_u^2 + 2 \cdot V_u \cdot (-V_{sp} - V_u)}{4 \cdot W_{HB}^2} \right). \quad (13)$$

Получаем квадратное уравнение, решение которого определяет величину эвапотранспирации:

$$A'_1 \cdot ET^2 + A'_2 \cdot ET + A'_3 = 0. \quad (14)$$

Фактические величины эвапотранспирации сравнивали с разработанной методикой (17) и общепринятыми аналитическими зависимостями А.М. Алпатьева (15) и С.И. Харченко (16) стандартными методами математической статистики с полученными коэффициентами внутриродовой корреляции менее 0,5 (рис. 2):

$$ET = K \cdot E_{\omega}, \quad (15)$$

$$ET = \left(K_1 \cdot \left(\frac{W_H + W_K}{2 \cdot W_{HB}} \right) + K'_1 \right) \cdot E_{\omega}, \quad (16)$$

$$ET = \left(a_0 + a_1 \cdot \left(\frac{W_H + W_K}{2 \cdot W_{HB}} \right) + a_2 \cdot \left(\frac{W_H + W_K}{2 \cdot W_{HB}} \right)^2 \right) \cdot E_{\omega}. \quad (17)$$

Отклонение величин влагозапасов в расчетном слое почвы за вегетацию, рассчитанных по эмпирической зависимости (15), от фактических значений — на 1,0...20,0 %; (16) — 0,5...10,0; (17) — 1,0...5,0 %;

Если критерий качества $\eta \leq 0,5$ — методика расчета хорошая с допустимыми отклонениями величин; $0,5 < \eta \leq 0,8$ — в целом удовлетворительная с недопустимыми отклонениями; $\eta > 0,8$ — дает существенные ошибки в отдельные временные периоды.

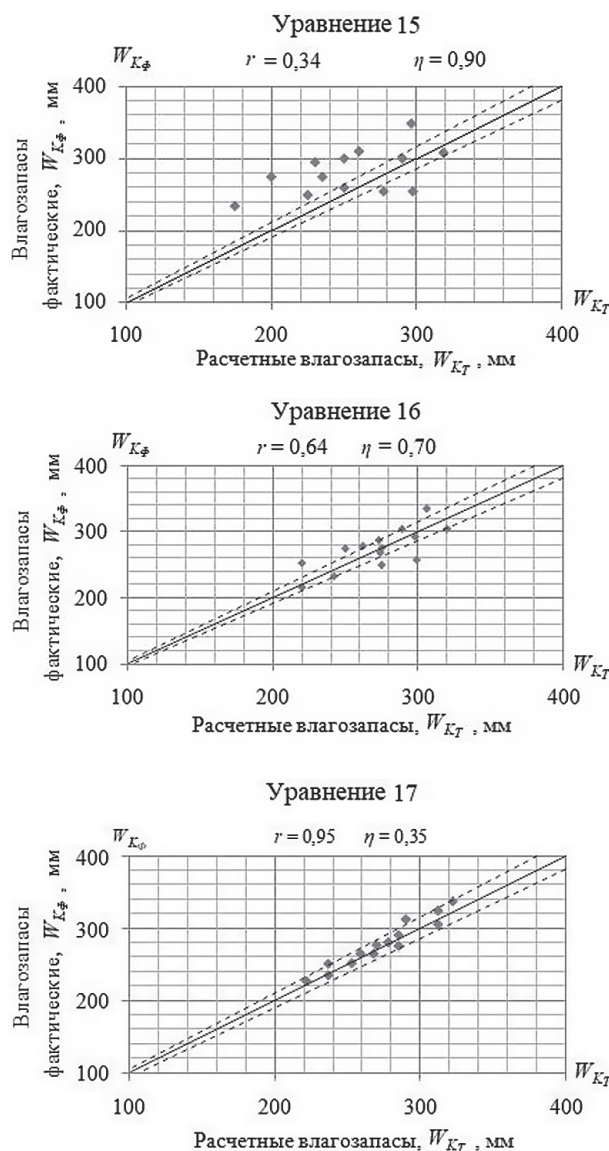


Рис. 2. Фактические ($W_{Kф}$) и расчетные ($W_{Kр}$) влагозапасы почвы: сплошная и пунктирные линии указывают на $W_{Kф} = W_{Kр}$ и $\pm 5\%$ их равенства соответственно.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бородычев, В.В. Техничко-технологические основы регулирования гидротермического режима агрофитоценоза в условиях орошения / В.В. Бородычев, М.Н. Лытов // Научная жизнь. — 2019. — Т. 14. — № 10(98). — С. 1484—1495.
2. Васильев, С.М. Регулирование управленческих процессов в структурированных проблемных ситуациях АПК / С.М. Васильев, Ю.Е. Домашенко // Вестник российской сельскохозяйственной науки. — 2018. — № 4. — С. 12—13.
3. Лихацевич, А.П. Использование обобщенной математической модели для анализа результатов многофакторных агрономических опытов / А.П. Лихацевич // Мелиорация и водное хозяйство. — 2018. — № 1. — С. 19—23.
4. Ольгаренко, В.И. Оптимизация процессов водопользования на основе методологии ландшафтно-экологического подхода: монография / В.И. Ольгаренко, Г.В. Ольгаренко, И.В. Ольгаренко. — Новочеркасск: Лик, 2019. — 624 с.

5. Abraha, M. Long-term evapotranspiration rates for rainfed corn versus perennial bioenergy crops in a mesic landscape / M. Abraha, J. Chen, S. Hamilton, G. Robertson // *Hydrological Processes*. — 2019. — Vol. 34, iss. 3. — P. 810–822.
1. Borodychev, V.V. Tekhniko-tehnologicheskie osnovy regulirovaniya gidrotermicheskogo rezhima agrofitocenoza v usloviyah orosheniya / V.V. Borodychev, M.N. Lytov // *Nauchnaya zhizn'*. — 2019. — T. 14. — № 10(98). — S. 1484–1495.
2. Vasil'ev, S.M. Regulirovanie upravlencheskih processov v strukturirovannyh problemnyh situatsiyah APK / S.M. Vasil'ev, Yu.E. Domashenko // *Vestnik Rossijskoj sel'skohozyajstvennoj nauki*. — 2018. — № 4. — S. 12–13.
3. Lihacevich, A.P. Ispol'zovanie obobshchennoj matematicheskoj modeli dlya analiza rezul'tatov mnogofaktornyh agronomicheskikh opytov / A.P. Lihacevich // *Melioraciya i vodnoe hozyajstvo*. — 2018. — № 1. — S. 19–23.
4. Ol'garenko, V.I. Optimizaciya processov vodopol'zovaniya na osnove metodologii landshaftno-ekologicheskogo podhoda: monografiya / V.I. Ol'garenko, G.V. Ol'garenko, I.V. Ol'garenko. — Novocherkassk: Lik, 2019. — 624 s.
5. Abraha, M. Long-term evapotranspiration rates for rainfed corn versus perennial bioenergy crops in a mesic landscape / M. Abraha, J. Chen, S. Hamilton, G. Robertson // *Hydrological Processes*. — 2019. — Vol. 34, iss. 3. — P. 810–822.

LIST OF SOURCES