

УДК 502.65

Усовершенствование метода SCS-CN для моделирования поверхностного стока в водонасыщенных ландшафтах

Искендерзаде Э.Б., Асадов Х.Г., Сулейманова Е. Дж.

Национальное Аэрокосмическое Агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика
10.18522/2308-9709-2024-47-1

Аннотация

В настоящее время одним из наиболее хорошо разработанных и простых концептуальных методов для предсказания поверхностного стока является метод (SCS-CN), т.е. метод пронумерованных кривых Департамента сельского хозяйства и Службы консервации почвы США. Метод CN был разработан для вычисления единого события проливного дождя, однако, далее был распространен на отдельные территории водных бассейнов. Простота и большие возможности документирования полученных результатов привели к широкому распространению этого метода, позволяющего оценить поверхностный сток единым показателем CN. Целью проведенного исследования является усовершенствование метода SCS-CN предназначенного для моделирования поверхностного стока в водонасыщенных ландшафтах. Предложена методика вычисления результирующей величины показателя CN по различным водонасыщенным участкам методом геометрического усреднения. Для результирующей оценки поверхностного стока в водном бассейне необходимо наличие информации о результирующем значении CN , потенциальном показателе водоудержания (S); начальной величине дождевых потоков $I_A=0,2S$; предшествующей величине показателя CN .

Определено, что при наличии определенной функциональной зависимости между площадью участка и его показателем CN показатель прямого водного потока для всех рассматриваемых участков водонасыщенного ландшафта может быть вычислен с учетом максимально возможной величины CN, вычисленной по всем участкам методом геометрического усреднения, а также нормировочного показателя, предназначенного для коррекции предварительно полученного результата прямого водного потока.

Ключевые слова: водонасыщенный ландшафт, поверхностный сток, моделирование, почва, оптимизация

Improvement of the SCS-CN Method for Modeling Surface Runoff in Water-Saturated Landscapes

Iskenderzade E.B., Asadov H.H., Suleymanova E.J.

National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan

10.18522/2308-9709-2024-47-1

Abstract

Currently, one of the most well-developed and simple conceptual methods for predicting surface runoff is the (SCS-CN) method, i.e. the numbered curves method of the U.S. Department of Agriculture and Soil Conservation Service. The CN method was developed to calculate a single torrential rain event, however, it was further extended to individual territories of water basins. The simplicity and great possibilities of documenting the results have led to the widespread use of this method, which allows estimating surface runoff with a single indicator CN. The purpose of the study is to improve the SCS-CN method designed for modeling surface runoff in water-saturated landscapes. A method for calculating the resulting value of the CN index for various water-saturated sites by geometric averaging is proposed. For the resulting assessment of surface runoff in a water basin, it is necessary to have information about the resulting CN value, the potential indicator of water retention (S); the initial value of rain flows $I_A=0.2S$; the previous value of the CN indicator.

It is determined that in the presence of a certain functional dependence between the area of the site and its CN indicator, the direct water flow indicator for all considered sections of the water-saturated landscape can be calculated taking into account the maximum possible value of CN calculated for all sections by geometric averaging, as well as a normalization indicator designed to correct the previously obtained result of direct water flow.

Keywords: water-saturated landscape, surface runoff, modeling, soil, optimization

Введение

Общепринято, что увеличение количества проливных дождей, приводящих к росту поверхностного стока воды является следствием как климатических изменений, так и изменений в землепользовании [1,2]. Согласно [3] прогнозирование поверхностного стока на водонасыщенных ландшафтах является одной из важных проблем прикладной гидрологии. В настоящее время одним из наиболее хорошо разработанных и простых концептуальных методов для предсказания поверхностного стока является метод (SCS-CN), т.е. метод пронумерованных кривых Департамента сельского хозяйства и Службы консервации почвы США, переименованного в настоящее время в Службу консервации природных ресурсов (NRCS). Простота и большие возможности документирования полученных результатов привели к широкому распространению этого метода, позволяющего оценить поверхностный сток единым показателем CN [4]. Как отмечается в работе [5], показатель CN обычно изменяется между 10 и 30. Низкий уровень поверхностного стока соответствует низкой величине CN, а высокий уровень – высокому значению показателя.

Вместе с тем, как указывается в этой работе, данный метод отражает характер землепользования в США, и в случае применения для других стран могут быть использованы различные статистические методы для вычисления единого показателя CN. Вместе с тем, показатель CN также характеризует уровень реализованных инженерных мероприятий, направленных на ослабление поверхностного стока [6]. Так, например, наличие созданных фильтрационных траншей может уменьшить вычисленную величину результирующего CN показателя. При этом, согласно [5], для вычисления единого среднего показателя CN для различных регионов могут быть использованы методы среднеарифметического, медианного и геометрического суммирования. В настоящей работе анализируются возможности средне интегрального метода усреднения в случае наличия функциональной связи между геометрической площадью регионов показателем CN этого региона.

Материалы и методы

Общая схема проводимых работ для вычисления единого показателя CN показана на рис. 1 [7].

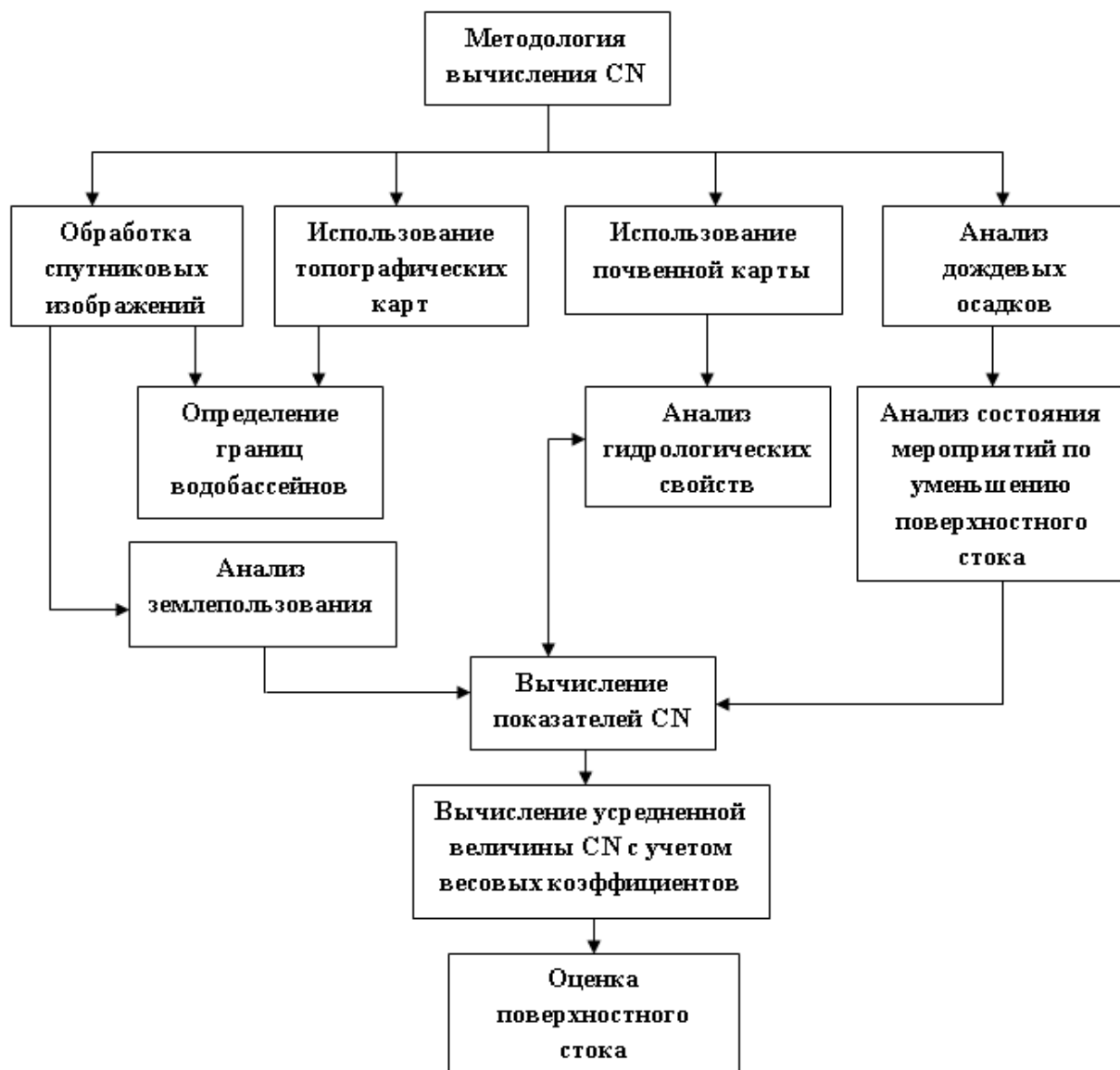


Рис. 1. Схема проводимых работ для вычисления единого показателя CN

Согласно [7], метод CN был разработан для вычисления единого события проливного дождя, однако, далее был распространен на отдельные территории водных бассейнов. При этом толщина водного стока определяется по следующей формуле:

$$Q = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S} \quad (1)$$

где Q – показатель прямого водного потока, указывающий толщину поверхностного стока; S – потенциально возможная величина удержания воды в почве; P – общее количество осадков.

Для вычисления CN показателя используется следующее выражение

$$S = \frac{25,400}{CN} - 24 \quad (2)$$

Значения CN табулированы согласно методике NRSC TR-55 для различных земельных покрытий и почвенных текстур.

Для результирующей оценки поверхностного стока в водном бассейне необходимо наличие информации о результирующем значении CN , потенциальном показателе водоудержания (S); начальной величине дождевых потоков $I_A=0,2S$; предшествующей величине показателя CN .

При этом результирующая величина CN по отдельным водонасыщенным участкам определяется как

$$CN_r = \frac{\sum_{i=1}^n CN_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (3)$$

где A_i – площадь i -го участка; CN_i – показатель CN для i -го участка.

Отметим, что выражение (3) соответствует среднеарифметическому весовому усреднению, хотя как было отмечено ранее допускается и геометрическое, и медианное усреднение. Следовательно, имеет смысл вводить некоторый нормировочный показатель

$$\gamma_j = \frac{CN_{cp.j}}{CN_{max}}; j = \overline{1,3} \quad (4)$$

где $j=1$ означает среднеарифметическое усреднение; $j=2$ – медианное усреднение; $j=3$ – геометрическое усреднение; CN_{max} – максимально возможное значение усредненной величины CN_r , вычисляемое по особой методике. В этом случае, при отсутствии информации о значениях $CN_{cp.j}$ можно будет использовать CN_{max} , а при наличии данных об $CN_{cp.j}$ воспользоваться величиной $\gamma_i \cdot CN_{max}$, предварительно вычислив коэффициент γ_i . Таким образом, ценность вводимого показателя γ_i заключается в возможности проведения расчетов CN и S по несколько смещенной шкале, или абсолютной шкале расчетов CN и S . Изложим предлагаемую методику расчета CN_{max} . Основные положения предлагаемой методики расчета следующие:

- 1) В дальнейшем рассмотрим вариант геометрического усреднения CN , которое определяется как

$$CN_g = \prod_{i=1}^n (CN_i)^{A_i} \quad (5)$$

- 2) Допускаем существование функциональной зависимости

$$CN_i = \varphi(A_i) \quad (6)$$

- 3) Логарифмирование (5) с учетом (6) дает

$$\ln CN_g = \sum_{i=1}^n A_i \ln \varphi(A_i) \quad (7)$$

4) Учитываем, что

$$\sum_{i=1}^n CN_i = C; C = const \quad (8)$$

С учетом вышеизложенного, можно составить следующую дискретную задачу вариационной оптимизации

$$F_g = \sum_{i=1}^n A_i \ln \varphi(A_i) + \lambda \left[\sum_{i=1}^n CN_i - C \right] \quad (9)$$

Непрерывный аналог задачи (9) имеет вид

$$F_H = \int_0^{A_{max}} A \ln \varphi(A) dA + \lambda \left[\int_0^{A_{max}} \varphi(A) dA - C \right] \quad (10)$$

Решение задачи (10) согласно [8] удовлетворяет условию

$$\frac{d \{ A \ln \varphi(A) + \lambda \varphi(A) \}}{d \varphi(A)} = 0 \quad (11)$$

Из условия (11) получим

$$\frac{A}{\varphi(A)} + \lambda = 0 \quad (12)$$

Из выражения (12) находим

$$\varphi(A) = \frac{-A}{\lambda} \quad (13)$$

Непрерывный аналог выражения (8) и запишем как

$$\int_0^{A_{max}} \varphi(A) dA = C \quad (14)$$

С учетом (13) и (14) получим

$$- \int_0^{A_{max}} \frac{A}{\lambda} dA = C \quad (15)$$

Из выражения (15) находим

$$\frac{-A_{max}^2}{2} = C \lambda \quad (16)$$

Из выражения (16) получим

$$\lambda = \frac{-A_{max}^2}{2C} \quad (17)$$

Учитывая (17) в (13) получаем

$$\varphi(A) = \frac{2AC}{A_{max}^2} \quad (18)$$

При решении (18) функционал F_H достигает максимума, т.к. производная (12) по $\varphi(A)$ оказывается отрицательной величиной.

С учетом $F_H = CN_g$ получим

$$\ln(CN_{gmax}) = \int_0^{A_{max}} A \ln \frac{2AC}{A_{max}^2} dA \quad (19)$$

или

$$CN_{gmax} = \exp \left[\int_0^{A_{max}} A \ln \frac{2AC}{A_{max}^2} dA \right] \quad (20)$$

Следовательно, с учетом (4) и (19) предлагаемый нормировочный показатель Y_i определится как

$$Y_i = \frac{CN_{cp.j}}{\exp \left[\int_0^{A_{max}} A \ln \frac{2AC}{A_{max}^2} dA \right]} \quad (21)$$

Таким образом, при отсутствии информации о значениях $CN_{cp.i}$ для предварительных расчетов можно использовать величину CN_{gmax} , определяемую по формуле (20), для последующей коррекции результатов предварительных расчетов можно воспользоваться коэффициентом Y_i , вычисляемым по формуле (21).

Заключение

Таким образом, предложено некоторое усовершенствование метода SCS-CN для моделирования поверхностного стока в водонасыщенных ландшафтах. Усовершенствование методики касается вычисления результирующей величины показателя CN по различным водонасыщенным участкам. Предложено вычислить результирующую величину CN методом геометрического усреднения.

Доказано, что при наличии определенной функциональной зависимости между площадью участка и показателем CN для всех рассматриваемых участков водонасыщенного ландшафта показатель прямого водного потока может быть рассчитан с учетом максимально возможной величины CN, вычисленной по всем участкам методом геометрического усреднения, при отсутствии реально вычисленной величины этого же показателя, а также нормировочного показателя, предназначенного для коррекции предварительно полученного результата прямого водного потока.

Литература/ References

1. Petrovic F., Stranovsky P., Muchova Z., Faltan V., Skokanova H., Havlicek M., Gabor M., Spulerova J. Landscape-ecological optimization of hydric potential in foothills region with dispersed settlements – a case study of Nova Bosaca, Slovakia // *Applied Ecology and Environmental Research*. 2017. 15(1). Pp. 379-400.
2. Kozma K., Puskas J., Dregelyi-Kiss A. The changes in precipitation during 124 years and its influences on the physical conditions of Hernad river // *Applied Ecology and Environmental Research*. 2014.12(2). Pp. 523-536.
3. Soulis K. X. Soil conservation service curve number (SCS-CN) method: current applications, remaining challenges and future perspectives // *Water* 2021. 13. 192. <https://doi.org/10.3390/w13020192>.
4. Ponce V. M., Hawkins R. H. Runoff curve number: has it reached maturity? // *J. Hydrol. Eng.* 1996. Pp. 11-19.
5. Ibrahim S., Brasi B., Yu q., Siddig M. Curve number estimation using rainfall and runoff data from five catchments in Sudan// *Open Geosciences*. 2022. 14. Pp. 294–303.
6. Huang W. S. C., You L. W., Tung Y. K., Yoo C. S. Assessing curve number uncertainty for green roofs in a stochastic environment // *The 4th International conference on water resource and environment (WRE 2018)*.
7. Vinithra R., Yeshodha L. Rainfall-runoff modelling using SCS-CN method: a case study of Krishnagiri district, Tamilnadu// *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2016.Vol. 5. Iss. 3.
8. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М.: Наука, 1974. 432.с. / Elsgolts L.E. Differential equations and calculus of variations. M.: Nauka, 1974. 432 p.