

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ВЫЧИСЛЕНИЯ РЕЖИМОВ НАВОДНЕНИЯ
С УЧЕТОМ ХАРАКТЕРИСТИК ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ПОЧВЫIMPROVEMENT OF FLOOD REGIME CALCULATION METHODOLOGY TAKING
INTO ACCOUNT SOIL MOISTURE CONTENT INDICES

Ключевые слова: почва, влагосодержание, наводнения, оптимизация, моделирование, предсказание.

Keywords: soil, moisture content, floods, optimization, modeling, forecast.

Для планирования и моделирования наводнений, вызванных проливными дождями, в настоящее время широко используются методы географических информационных систем. Эти методы также применяются в комбинации с другими, такими как «tasseled cap transformation», а также с методом SCS, разработанным Национальной службой консервации ресурсов, США. Основные параметры этой гидрологической модели зависят от показателей землепользования и свойств почвы. В указанной модели толщина водяного потока при наводнениях, вызванных проливными дождями, определяется в зависимости от общего показателя дождевых осадков и показателя первичного удаления воды до возникновения наводнения. Исследуется вопрос об оптимальной связи указанных показателей. Сформулирована и решена математическая задача, связанная с использованием математического аппарата безусловной вариационной оптимизации. В результате решения оптимизационной задачи получена аналитическая формула, позволяющая вычислить оптимальную взаимосвязь указанных параметров, при которой суммарная толщина водного потока над поверхностью земли, вычисленная по всем рассматриваемым случаям наводнений, достигла бы минимальной величины.

The methods of Geographic Information Systems (GIS) are widely used at present time for planning and modeling floods caused by rainfalls. At the same time the methods of GIS are used also in combination with other methods as "tasseled cap transformation" and SCS method developed by the Natural Resources Conservation Service (NRCS), an agency of the USDA. The major parameters of SCS method based on hydrological model depend on parameters of land use and the soil properties. In this model, the depth of the water flow upon flooding caused by heavy rainfalls is determined depending on general indicator of rain precipitation and parameter of initial removal of water before the occurrence of flooding. In this paper, the issue on optimum interrelation of above mentioned parameters is studied. The mathematical task of optimization using the mathematical method of non-conditional variation optimization is formulated and solved. As a result of the solution of the optimization task, an analytical equation is obtained. This equation makes it possible to calculate the optimum interrelation between these parameters upon which the total depth of water flow over the land surface calculated for all studied cases of floods would reach the minimum amount.

Данзиев Рамал Мирзагасан оглы, ст. преп., Азербайджанский университет архитектуры и строительства, г. Баку, Азербайджанская Республика. E-mail: danziyev85@rambler.ru.

Джавадов Натиг Гаджи оглы, д.т.н., проф., ген. директор, ПО «Промавтоматика», г. Баку. Азербайджанская Республика. E-mail: javadovng@mail.ru.

Danziyev Ramal Mirzahasan oglu, Asst. Prof., Azerbaijan University of Architecture and Construction, Baku, Republic of Azerbaijan. E-mail: danziyev85@rambler.ru.

Javadov Natiq Haji oglu, Dr. Tech. Sci., Prof., General Director, PO "Promavtomatika", Baku, Republic of Azerbaijan. E-mail: javadovng@mail.ru.

Введение

Хорошо известно, что одним из основных причин наводнений являются проливные дожди [1-4].

Как отмечается в работе [5], для планирования и моделирования наводнений, вызванных проливными дождями, с применением ГИС и средств дистанционного зондирования широко используется разработанная NRCS (национальная служба консервации ресурсов, США) гидрологическая модель в сочетании с методом SCS-TR55. Основные параметры этой модели [5] зависят

от таких показателей поверхности земли, как система землепользования и свойств почвы. В указанной модели толщина водяного потока при наводнениях, вызванных проливными дождями R , определяется как

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

$$R=0 \text{ при } P < 0,2S, \quad (2)$$

где R – измеряется в мм;

P – дождевые осадки, мм;

S – потенциально возможная максимальная величина водоудержания почвы, мм.

Существует следующая связь между показателем S и обобщенным показателем CN:

$$S = \frac{25400}{CN} - 25,4. \quad (3)$$

Согласно [5], показатель CN является функцией многих физических параметров территории, таких как состояние влажности почвы; наклона поверхности; типа и плотности растительности; типа землепользования. Величина CN изменяется в пределах 0-100. Значения CN для разных типов почвы и системы землепользования приведены в таблице 1.

Значения CN для разных типов почвы и систем землепользования.

Таблица 1

Значения CN для разных типов земли и землепользования

Покров земли/землепользование	CN
«Голая» почва	86
Обработанная земля	95
Травы	80
Леса	79
Водные системы	100

Вместе с тем, согласно работе [6], модель SCS, разработанная в 1972 г., предусматривает вычисление показателя R по следующей более общей формуле:

$$R = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S}, \quad P > I_a \quad (4)$$

$$R = 0, \quad P < I_a, \quad (5)$$

где I_a – показатель первичного удаления воды, мм, характеризующий потери воды, возникающие из-за захвата, фильтрации и хранения водной массы поверхностью почвы, возникающий до появления признаков наводнения.

При этом показатель S определяет фильтрацию водной массы в почвы после появления наводнения. Согласно [7],

$$I_a = 0,2 \cdot S. \quad (6)$$

С учетом (4) и (6) нетрудно получить формулу (1), приведенную в [5].

Между тем в работах [6, 7] не решен вопрос: как связаны такие показатели, как P и I_a и при каком виде их взаимосвязи суммарная толщина водного потока над поверхностью земли, вычисленная по всем

рассматриваемым случаям наводнений, достигла бы минимальной величины.

Объект, цель и задачи исследований

Объектом исследования являются наводнения, вызванные проливными дождями.

Цель проводимого исследования – нахождение такой оптимальной взаимосвязи между показателями P и I_a , при которой суммарная толщина водного потока над поверхностью земли, вычисленная по всем рассматриваемым случаям наводнений, достигла бы минимума.

Результаты исследований

Согласно [6], показатель $\frac{I_a}{S}$ в водонасыщенных регионах (в устьях рек, в прибрежных зонах и т.д.) резко отличается от значения 0,2.

В результате исследований, проведенных в [6], было обнаружено, что в водонасыщенных зонах показатель $\frac{I_a}{S}$ в среднем

равен 0,014. Значения $\frac{I_a}{S}$ для 18 исследованных случаев наводнений, возникших из-за проливных дождей, приведены в таблице 2 [6].

Согласно работе [6], величина отношения I_a/S в основном близка к 0,01 и не зависит от значения показателя P, что иллюстрируется на рисунке.

Решение задачи

Для удобства дальнейшей математической записи обозначим $I_a = X$. Введем на рассмотрение искомую функцию $X = X(P)$. Суммарное количество водной массы по упорядоченному множеству $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$, где $P_i < P_{i+1}$; $i = \overline{1, (n-1)}$ в условно непрерывном виде вычислим как

$$P_\Sigma = \int_0^{P_{\max}} \frac{[P - X(P)]^2}{[P - X(P)] + S} dP. \quad (7)$$

Согласно вышеизложенному, отношение $X(P)/S$ не зависит от величины P. Это обстоятельство позволяет найти следующее ограничительное условие

$$\int_0^{P_{\max}} \frac{X(P)}{S} dP = C, \quad (8)$$

где $C = \text{const}$.

Значения отношения $\frac{I_a}{S}$ для 18 случаев наводнений, возникших из-за проливных дождей

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P, мм	5,60	6,53	9,59	11,22	14,26	15,23	17,05	17,26	21,09
I _a , мм	1,7	1,4	2,3	1,8	3,7	0,9	7,0	5,4	7,9
I _a /S	0,02	0,013	0,014	0,012	0,011	0,004	0,037	0,008	0,013

№	10	11	12	13	14	15	16	17	18
P, мм	21,92	29,44	39,20	70,93	71,11	76,66	91,84	100,37	117,58
I _a , мм	7,4	7,3	10,9	10,1	12,0	6,1	7,2	4,3	6,6
I _a /S	0,030	0,022	0,016	0,013	0,013	0,009	0,008	0,011	0,008

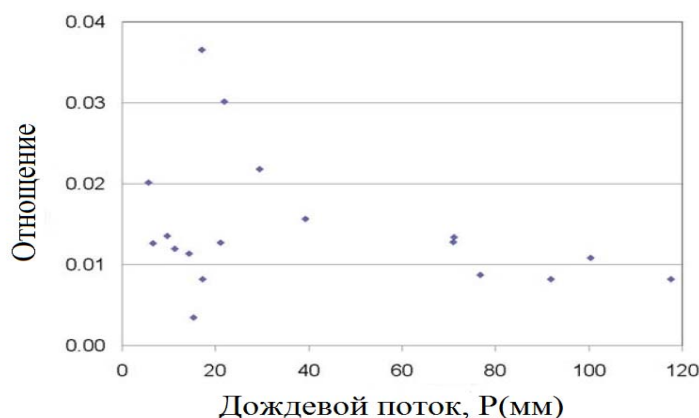


Рис. Взаимная связь показателей $\frac{I_a}{S}$ и P [6]

С учетом выражений (7) и (8) можно определить следующий функционал безусловной вариационной оптимизации

$$P_{\Sigma,0} = \int_0^{P_{\max}} \frac{[P - X(P)]^2}{[P - X(P)] + S} dP + \lambda \int_0^{P_{\max}} \frac{X(P)}{S} dP, \quad (9)$$

где λ – множитель Лагранжа.

Согласно теории Эйлера [8], оптимальная функция $X(P)$, приводящая $P_{\Sigma,0}$ к экстремальной величине должна удовлетворить условию

$$d \left\{ \frac{[P - X(P)]^2}{[P - X(P)] + S} + \frac{\lambda \cdot X(P)}{S} \right\} dx(P) = 0. \quad (10)$$

С учетом выражений (9) и (10) находим

$$\frac{-2[P - X(P)] \cdot [P - X(P) + S] + [P - X(P)]^2}{[[P - X(P)] + S]^2} + \frac{\lambda}{S} = 0. \quad (11)$$

Приняв $P - X(P) = Y$, получим

$$(12)$$

$$\frac{-2Y^2 - 2YS + Y^2}{(Y + S)^2} + \frac{\lambda}{S} = 0. \quad (13)$$

Выражение (13) нетрудно представить в виде квадратичного уравнения

$$Y^2 + \frac{2Y(S - \lambda)}{1 - \lambda/S} - \frac{\lambda \cdot S}{1 - \lambda/S} = 0. \quad (14)$$

Решение уравнения (14) дает

$$Y = -\frac{(S - \lambda)}{1 - \lambda/S} + \sqrt{\left[\frac{(S - \lambda)}{1 - \lambda/S} \right]^2 + \frac{\lambda S}{1 - \lambda/S}}. \quad (15)$$

Из выражения (12) и (15) имеем

$$X(P) = P - Y. \quad (16)$$

С учетом (16) и (8) находим

$$\int_0^{P_{\max}} \frac{P - Y}{S} dP = C. \quad (17)$$

Из выражения (17) находим

$$Y = \frac{P_{\max}}{2} - \frac{CS}{P_{\max}}. \quad (18)$$

Используя выражения (12) и (18) окончательно получаем

$$X(P) = P - \frac{P_m}{2} + \frac{CS}{P_m}. \quad (19)$$

Таким образом, при зависимости (19) функционал (7) достигает экстремальной величины. Проанализируем характер данного экстремума. Используем метод дифференцирования:

$$F = \frac{d^2 \left\{ \frac{[P - X(P)]^2}{[P - X(P)] + S} + \lambda \frac{X(P)}{S} \right\}}{d(X(P))^2}.$$

Проведенный анализ даст следующее условие

$$F = 2(P - X(P)) + 2S,$$

так как по определению $P \geq X(P)$ получаем $F > 0$.

Следовательно, соблюдение оптимального условия (19) позволяет минимизировать суммарную толщину водного потока, вычисленную по всем рассмотренным случаям наводнений в водонасыщенных почвах.

Заключение

Как видно из данных, представленных в таблице 2, до 14-го исследованного случая наводнения условие (19) соблюдается, но в интервале 15-18 условие оптимальности нарушено. Следовательно, можно ожидать, что расчетная суммарная величина толщины водяного потока в данном случае будет выше потенциально возможного минимума.

Таким образом, проведенный анализ позволяет расширить возможности известного метода SCS-TR55 в плане выявления условия достижения суммарной толщины водяного потока, рассчитанного по серии предстоящих наводнений, вызываемых проливными дождями в водонасыщенных почвах.

Библиографический список

1. Lopez V., Napolitano F., Russo F. Calibration of rainfall-runoff model using radar and rain gauge data // *Advanced Geosciences*. – 2005. – Vol. 2. – P. 41-46. <http://www.adv-geosci.net/2/41/2005/> (Data obrashcheniya 01.12.2016).
2. Russo F., Lombardo F., Napolitano F., Gorgucci E. Rainfall stochastic modeling for runoff forecasting // *Physics and Chemistry of Earth*. – 2006. – Vol. 31 (18). – P. 1251-1261.

3. Krstanovic P.F., Singh V.P., 1992. Evaluation of rainfall networks using entropy: I. Theoretical development // *Water Resour. Management*. – 1992. – Vol. 6. – P. 279-293.

4. Yoo C., Jung K., Lee J. Evaluation of rain gauge network using entropy theory: Comparison of mixed and continuous distribution function applications // *Journal of Hydrological Engineering*. – 2008. – Vol. 13 (4). – P. 226-235.

5. Wang X., Gu X., Wu Z., Wang C. Simulation of flood inundation of Guiyang city using remote sensing, GIS and hydrologic model. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B8. Beijing 2008. http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/8_pdf/7_WG-VIII-7/09.pdf. (Data obrashcheniya 01.12.2016).

6. Baltas E.A., Dervos N.A., Mimi-kou M.A. Technical Note: Determination of the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece // *Hydrology and Earth System Sciences Discussions, European Geosciences Union*. – 2007. – Vol. 11 (6). – P. 1825-1829.

7. Matori A.N., Lawal D.U., Yusof K.W., Hashim M.A., Balogun. A.-L. Spatial Analytic Hierarchy Process Model for Flood Forecasting: An Integrated Approach // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2014. – Vol. 20. – Conf. 1.

8. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. – М.: НАУКА, 1963. – 424 с.

References

1. Lopez V., Napolitano F., Russo F. Calibration of rainfall-runoff model using radar and rain gauge data // *Advanced Geosciences*. – 2005. – Vol. 2. – P. 41-46. <http://www.adv-geosci.net/2/41/2005/> (Data obrashcheniya 01.12.2016).
2. Russo F., Lombardo F., Napolitano F., Gorgucci E. Rainfall stochastic modeling for runoff forecasting // *Physics and Chemistry of Earth*. – 2006. – Vol. 31 (18). – P. 1251-1261.
3. Krstanovic P.F., Singh V.P., 1992. Evaluation of rainfall networks using entropy: I. Theoretical development // *Water Resour. Management*. – 1992. – Vol. 6. – P. 279-293.
4. Yoo C., Jung K., Lee J. Evaluation of rain gauge network using entropy theory: Comparison of mixed and continuous distribution function applications // *Journal of Hydrological Engineering*.

drological Engineering. – 2008. – Vol. 13 (4). – P. 226-235.

5. Wang X., Gu X., Wu Z., Wang C. Simulation of flood inundation of Guiyang city using remote sensing, GIS and hydrologic model. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B8. Beijing 2008. http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/8_pdf/7_WG-VIII-7/09.pdf. (Data obrashcheniya 01.12.2016).

6. Baltas E.A., Dervos N.A., Mimi-kou M.A. Technical Note: Determination of

the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece // Hydrology and Earth System Sciences Discussions, European Geosciences Union. – 2007. – Vol. 11 (6). – P. 1825-1829.

7. Matori A.N., Lawal D.U., Yusof K.W., Hashim M.A., Balogun. A.-L. Spatial Analytic Hierarchy Process Model for Flood Forecasting: An Integrated Approach // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2014. – Vol. 20. – Conf. 1.

8. Elsgolts L.E. Differentsialnye uravneniya i variatsionnoe ischislenie. – M.: Nauka, 1963. – 424 s.

