

УДК 528+551.4

С.И. Горелик

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОН ВОЗМОЖНЫХ ПОДТОПЛЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОЙ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Проведена оценка степени влияния факторов подтопления на основе построения графиков функций принадлежности. Анализ произведен по следующим факторам: превышение над уровнем реки, глубина залегания водоупорного слоя и эксплуатация мело-мергельного водоносного горизонта. Зависимости получены по результатам обработки обобщенной геологической информации и данных буровых скважин. Приведенные результаты позволяют более точно локализовать зоны подтопления и степень их подтопленности, а также оперативно принимать меры по предупреждению негативных последствий процессов подтопления.

Ключевые слова: подтопление подземными водами, функции принадлежности нечетких множеств, водоупорный слой, мело-мергельный водоносный горизонт, превышение над уровнем реки.

Введение

Интенсивная урбанизация территорий приводит к многочисленным неблагоприятным процессам, следствием которых является деформация зданий и сооружений, ухудшение санитарно-эпидемиологических условий жизнедеятельности людей. Одним из таких процессов является подтопление подземными водами. В Харьковской области подтопленными являются 18,8 тыс. га сельхозугодий и свыше 13 тыс. га территорий городов и сел, что составляет около 1% от площади области [1].

Определение зон возможных подтоплений по данным ДЗЗ невозможно без учета причин их возникновения. Цифровая обработка снимков с целью выявления территорий с неглубоким залеганием подземных вод требует привлечения статистического геологического материала.

Установление классификационных признаков по степени подтопления территорий осуществляется на основе анализа функциональных зависимостей, описывающих полученные графики функций принадлежности факторов подтоплений к различным категориям. Функции принадлежности построены на основе обобщенной статистической информации по данным геологических исследований [1] и буровых учетных карточек.

Постановка задачи. Для принятия решений о степени подтопленности территории и возможных для неё рисков необходимо оценить степень влияния каждого фактора на подъем уровня грунтовых вод.

Процессы подтопления вызываются природными и антропогенными факторами. Графики принадлежности нечетких множеств [2] построены по следующим факторам подтопления, которые можно оценить статистически (остальные определены с помощью экспертных оценок):

- превышение над уровнем реки (места разгрузки подземных вод);
- глубина залегания водоупорного слоя;
- эксплуатация мело-мергельного водоносного горизонта.

1. Влияние превышения над уровнем реки на процессы подтопления

Предрасположенность территорий к процессам подтопления определяется геоморфологическими особенностями. В гумидном климате разгрузка подземных вод осуществляется в природные водотоки и водоемы [3], поэтому уровень грунтовых вод будет зависеть от превышения над уровнем реки. В зарегулированных реках искусственные водохранилища создают подпор грунтовым водам, тем самым приводя к поднятию их уровня [4]. Для территории Харьковской области построены функции принадлежности нечетких множеств, зависящих от превышения над уровнем реки, с учетом категоризации зон подтоплений (рис. 1.).

Данные получены при обработке учетных карточек буровых скважин.

Представленные на графике нечеткие множества описываются следующими зависимостями 1 – 4.

Для имеющихся категорий подтоплений введем следующие обозначения: A – нечеткое множество, описывающее I категорию подтопления [2], определяется как совокупность упорядоченных пар $\langle x, \mu_A(x) \rangle$, где x – превышения над уровнем реки, изменяющееся в диапазоне от 0 до 176 м. Максимальное превышение 176 м наблюдается в юго-восточной части Харьковской области. Соответственно, нечеткое множество B описывает II категорию подтопления, C – III категорию подтопления и D – неподтопляемые территории.

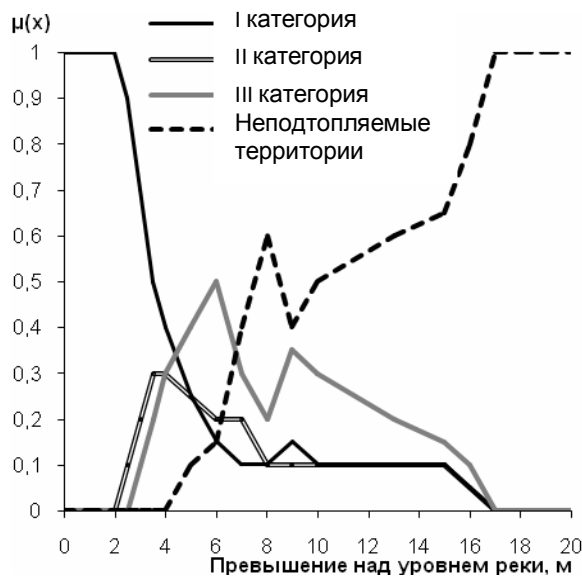


Рис. 1. График функций принадлежности нечетких множеств от превышения над уровнем реки с учетом категоризации зон подтоплений

$$\mu_{\mathcal{A}}(x) = \begin{cases} 1, & x \in [0;2] \\ 0,0355x^2 - 0,4995x + 1,857, & x \in [2;7] \\ 0,1, & x \in [7;8] \\ 0,05x - 0,3, & x \in [8;9] \\ -0,05x + 0,6, & x \in [9;10] \\ 0,1, & x \in [10;15] \\ -0,05x + 0,85, & x \in [15;17] \\ 0, & x \in [17;176] \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_{\mathcal{B}}(x) = \begin{cases} 0, & x \in [0;2] \\ 0,2x - 0,4, & x \in [2;3,5] \\ 0,3, & x \in [3,5;4] \\ -0,05x + 0,5, & x \in [4;6] \\ 0,2, & x \in [6;7] \\ -0,1x + 0,9, & x \in [7;8] \\ 0,1, & x \in [8;15] \\ -0,05x + 0,85, & x \in [15;17] \\ 0, & x \in [17;176]. \end{cases} \quad (2)$$

При незначительных превышениях местности $x \in [0;4]$ над уровнем водотока территория является подтопленной. Значение $\mu_{\mathcal{A}}(x)=1$ характерно только для прирусловой части поймы с превышением $x \in [0;2]$. $\mu_{\mathcal{B}}(x)$ достигает максимального значения 0,3 при $x \in [2;2,5]$, $\mu_{\mathcal{C}}(x)=0,5$ при $x=6$. Наибольшие значения функций принадлежности II и III категории подтопления соответствуют краевым территориям поймы на границе с первыми речными террасами. Данные результаты свидетельствуют о значительном развитии процессов подтопления в пойменных участках. Для основной части поймы $\mu_{\mathcal{D}}(x)=0$ при $x \in [0;4]$.

$$\mu_{\mathcal{C}}(x) = \begin{cases} 0, & x \in [0;2,5] \\ 0,2x - 0,5, & x \in [2,5;4] \\ 0,1x - 0,1, & x \in [4;6] \\ 0,05x^2 - 0,85x + 3,8, & x \in [6;8] \\ 0,15x - 1, & x \in [8;9] \\ 0,0023x^2 - 0,893x + 0,965, & x \in [9;15] \\ -0,025x^2 + 0,725x - 5,1, & x \in [15;17] \\ 0, & x \in [17;176] \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_{\mathcal{D}}(x) = \begin{cases} 0, & x \in [0;4] \\ -0,025x^2 + 0,325x - 0,9, & x \in [4;6] \\ 0,225x - 1,2, & x \in [6;8] \\ -0,2x + 2,2, & x \in [8;9] \\ 0,1x - 0,5, & x \in [9;10] \\ -0,00128x^2 + 0,0628x, & x \in [10;15] \\ 0,025x^2 - 0,625x + 4,4, & x \in [15;17] \\ 0,99, & x \in [17;176]. \end{cases} \quad (4)$$

Функция принадлежности неподтопляемых территорий возрастает в интервале $x \in [4;17]$ и достигает $\mu_{\mathcal{D}}(x)=0,99$ при $x=17$. В промежутке $x \in [8;10]$ функция имеет минимум в точке с координатами (9, 0,4). Далее при $x \in [17;176]$ вероятность развития естественного подтопления практически отсутствует. Природным фактором, повышающим вероятность возникновения такого процесса, является неглубокое залегания водоупорных пород, которые могут создавать временный (верховодка) или постоянный водоносный горизонт.

$\mu_{\mathcal{A}}(x)$ монотонно убывает в промежутке $x \in [2;7]$. При $x \in [7;8]$ $\mu_{\mathcal{A}}(x)=0,1$. Вероятность подтопления незначительно увеличивается от 0,1 до 0,15 при $x \in [9]$ и далее $x \in [10;15]$ $\mu_{\mathcal{A}}(x)=0,1$. Функция монотонно убывает $x \in [15;17]$, достигая значения 0. $\mu_{\mathcal{B}}(x)$ монотонно возрастает $x \in [2;3,5]$ и при $x \in [3,5;4]$ $\mu_{\mathcal{A}}(x)=0,3$. В интервале $x \in [4;8]$ функция принадлежности II категории подтопления убывает и, принимая значение 0,1, постоянна в промежутке $x \in [8;15]$. Далее монотонно убывает $x \in [15;17]$ и достигает значения $\mu_{\mathcal{B}}(x)=0$. Функция принадлежности III категории подтопления возрастает в интервале $x \in [2,5;6]$ и принимает максимальное значение $\mu_{\mathcal{C}}(x)=0,5$. В интервале $x \in [6;8]$ функция монотонно убывает и достигает $\mu_{\mathcal{C}}(x)=0,2$. Точка (9, 0,35) является экстремумом функции $\mu_{\mathcal{C}}(x)$. $\mu_{\mathcal{C}}(x)$ монотонно убывает в промежутке $x \in [9;17]$ и принимает значение 0. $\mu_{\mathcal{A}}(x)=0$, $\mu_{\mathcal{B}}(x)=0$, $\mu_{\mathcal{C}}(x)=0$ при $x \in [17;176]$.

Вероятность процессов подтопления уменьшается на I надпойменной террасе и полностью отсутствует на II боровой, имеющей превышения над уровнем реки свыше 15 м. Увеличение вероятности

подтопления с 0,4 до 0,6 наблюдается при превышениях от 8 до 15, достигая максимума при 9 м. Это характерно для левобережья большинства рек Харьковской области. Значительная часть рек имеет асимметричную долину с пологим левым берегом и крутым правым, на котором процессы подтопления практически отсутствуют. На III-VII речных террасах левобережья, в связи распространением эолово-делювиальных отложений II-й надпойменной террасы, которая в рельефе иногда отличается от соседних на 10 м и более, наблюдается процессы подтопления. Это связано с наличием замкнутых территорий, ограниченных II-й бортовой и последующими террасами, в которых с образовались болота [1].

2. Степень влияния глубины залегания водоупорного слоя на подтопление

Дополнительным природным фактором, влияющим на возникновение подтопления, служит неглубокое залегание водоупорных пород [5]. Данный фактор может способствовать возникновению процессов подтопления на водораздельных пространствах и «высоких» террасах. На рис. 2 представлен график функций принадлежности нечетких множеств различных категорий подтоплений, зависящих от глубины залегания водоупорных пород.

Из представленных функций принадлежностей нечетких множеств, процессам подтопления подвержены территории, где глубина залегания водоупора составляет от 0 до 7 м. Далее вероятность возникновения подтопления закономерно уменьшается и при глубинах залегания водонепроницаемых пород свыше 17 м, закономерность в развитии процессов подтопления не наблюдается. При значительных глубинах залегания водоупорной толщи, УГВ будет зависеть от превышения над местом разгрузки подземных вод. Наибольшее влияние имеет положение водонепроницаемой толщи над уровнем водотока, где происходит разгрузка подземных вод [3].

Ниже приведены (5, 6, 7, 8) функции принадлежности нечетких множеств различных категорий подтоплений, зависящих от глубины залегания водоупора.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in [0;5] \\ -0,07x + 1,357, & x \in [5;7] \\ -0,26x + 2,69, & x \in [7;9] \\ -0,08x + 1,08, & x \in [9;11] \\ 0,032x - 0,186, & x \in [11;13] \\ 0,0061x^2 - 0,2412x + 2,333, & x \in [13;17] \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu_B(x) = \begin{cases} 0, & x \in [0;7] \\ 0,08, & x \in [7;15] \\ 0,045x - 0,59, & x \in [15;17] \end{cases} \quad (6)$$

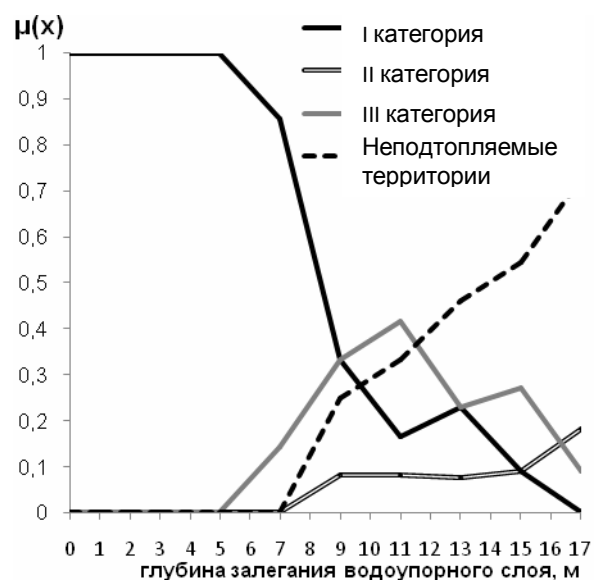


Рис. 2. График функций принадлежности нечетких множеств от глубины залегания водоупорного слоя с учетом категоризации зон подтоплений

$$\mu_C(x) = \begin{cases} 0, & x \in [0;5] \\ 0,0063x^2 - 0,005x - 0,1313, & x \in [5;9] \\ 0,042x - 0,042, & x \in [9;11] \\ 0,093x + 1,439, & x \in [11;13] \\ 0,021x - 0,042, & x \in [13;15] \\ -0,091x + 1,636, & x \in [15;17] \end{cases} \quad (7)$$

$$\mu_D(x) = \begin{cases} 0, & x \in [0;7] \\ 0,125x - 0,875, & x \in [7;9] \\ 0,0492x - 0,193, & x \in [9;17] \end{cases} \quad (8)$$

I категория подтопления напрямую зависит от глубины залегания водонепроницаемых пород. Нечеткое множество $\mu_A(x)=1$ тождественно при глубине залегания $x \in [0;5]$. В интервале $x \in [5;11]$ вероятность подтопления закономерно уменьшается до $\mu_A(x)=0,17$. Небольшое увеличение значения функции принадлежности до $\mu_A(x)=0,23$ наблюдается при увеличении глубины с 11 до 13 м. Далее функция монотонно убывает, достигая минимума $\mu_A(x)=0$ при значении $x=17$ м. Незначительное увеличение вероятности подтопления в интервале $x \in [11;13]$, при общем убывании функции принадлежности, связано с неполнотой геологической информации.

Влияние глубины водоупора для II категории подтопления практически не сказывается. Для территорий с неглубоким залеганием водоупора $x \in [0;7]$ вероятность подтопления практически отсутствует. При значениях $x \in [7;9]$ значение функции принадлежности увеличивается на 0,1 и далее при $x \in [9;15]$ не изменяется. Максимальное значение $\mu_B(x)=0,18$ достигает в интервале $x \in [15;17]$ и не

зависит от глубины водоупорной толщи, а связано с превышением над уровнем реки.

На III категорию подтопления данный фактор имеет значительное влияние. При неглубоком залегании $x \in [0; 5]$ $\mu_C(x) = 0$. Данная зависимость объясняется тем, что I категория подтопления имеет значения $\mu_A(x) = 1$ на данном промежутке. Функция принадлежности монотонно возрастает в интервале $x \in [5; 11]$ и принимает значение в точке максимума $\mu_C(x) = 0,42$. При $x \in [5; 17]$ наблюдается спад функции принадлежности. Незначительное возрастание происходит в промежутке $x \in [13; 15]$ достигая максимума $\mu_C(x) = 0,27$.

Для неподтопляемых территорий наблюдается прямая зависимость в промежутке $x \in [0; 17]$. $\mu_D(x) = 0$ при $x \in [0; 7]$. Вероятность возникновения процессов подтопления увеличивается в интервале $x \in [7; 17]$ достигая значения $\mu_D(x) = 0,72$. При больших глубинах залегания водоупора зависимость от вероятности возникновения подтопления не наблюдается.

3. Влияние техногенного фактора на понижение уровней грунтовых вод

Геологическое строение г. Харькова обуславливает наличие подпора мело-мергельным водоносным горизонтом (ММВГ) грунтовых вод в долинах рек. Эксплуатация ММВГ до 90^х гг. XX в. способствовало понижению уровня в горизонте до 40 м на водозаборах и до 10-20 м в городе [6]. После практически полного прекращения отбора подземной воды из ММВГ уровни стали восстанавливаться и начался подъем УГВ [7]. На рис. 3. представлено влияние объемов водоотбора на процесс возникновения подтоплений.

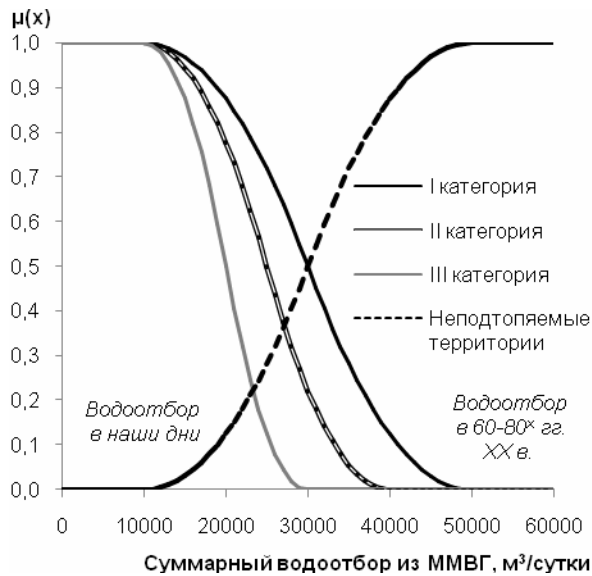


Рис. 3. График функций принадлежности нечетких множеств от суммарного водоотбора из мело-мергельного водоносного горизонта с учетом категоризации зон подтоплений

Водоотбор из ММВГ оказывает наибольшее влияние на процессы подтопления в пределах поймы и низких «террасах». Ниже приведены формулы (9, 10, 11, 12), описывающие данную зависимость.

Функция принадлежности $\mu_A(x) = 1$ соответствует водоотбору $x \in [0; 10000]$. При увеличении добычи воды из ММВГ до $x = 50\,000\text{ м}^3/\text{сут}$ [1] вероятность подтопления $\mu_A(x) = 0$. В интервале $x \in [10000; 50000]$ функция принадлежности монотонно убывает.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in [0; 10\,000] \\ 1 - 2\left(\frac{x - 10000}{40000}\right)^2, & x \in [10\,000; 30\,000] \\ 2\left(\frac{50000 - x}{40000}\right)^2, & x \in [30\,000; 50\,000] \\ 0, & x \in [50\,000; 60\,000] \end{cases} \quad (9)$$

$$\mu_B(x) = \begin{cases} 1, & x \in [0; 10\,000] \\ 1 - 2\left(\frac{x - 10000}{30000}\right)^2, & x \in [10\,000; 25\,000] \\ 2\left(\frac{40000 - x}{30000}\right)^2, & x \in [25\,000; 40\,000] \\ 0, & x \in [40\,000; 60\,000] \end{cases} \quad (10)$$

$$\mu_C(x) = \begin{cases} 1, & x \in [0; 10\,000] \\ 1 - 2\left(\frac{x - 10000}{20000}\right)^2, & x \in [10\,000; 20\,000] \\ 2\left(\frac{30000 - x}{20000}\right)^2, & x \in [20\,000; 30\,000] \\ 0, & x \in [30\,000; 60\,000] \end{cases} \quad (11)$$

$$\mu_D(x) = \begin{cases} 0, & x \in [0; 10\,000] \\ 2\left(\frac{x - 10000}{40000}\right)^2, & x \in [10\,000; 30\,000] \\ 1 - 2\left(\frac{50000 - x}{40000}\right)^2, & x \in [30\,000; 50\,000] \\ 1, & x \in [50\,000; 60\,000] \end{cases} \quad (12)$$

При незначительной добыче воды $x \in [0; 10000]$ вероятность возникновения подтопления по II и III категории составляет 1 [1]. Для II категории при водоотборе $x \in [10000; 40000]$ функция принадлежности монотонно убывает и принимает значение $\mu_B(x) = 0$ при $x = 40000\text{ м}^3/\text{сут}$. При больших водоотборах $x \in [40000; 60000]$ $\mu_B(x) = 0$. Монотонное убывание функции принадлежности III категории подтопления характерно на промежутке от $x \in [10000; 30000]$. Влияние пьезометрического уровня ММВГ при отборе воды $x \in [30000; 60000]$ не сказывается на возникновении процессов подтопления III категории ($\mu_C(x) = 0$).

Функция принадлежности $\mu_{\mathcal{D}}(x)=0$ соответствует промежутку $x \in [0; 10000]$. В интервале $x \in [10000; 50000]$ функция монотонно возрастает и при $x \in [50000; 60000]$ $\mu_{\mathcal{D}}(x)=1$.

Заключение

Для предотвращения негативных последствий процессов подтопления необходимо своевременное принятие решений по предупреждению опасных процессов и явлений.

Полученные зависимости функций принадлежности позволяют определить зоны возможных подтоплений и провести их классификацию по степени подтопленности в условиях неопределенности.

Проведенный анализ функциональных зависимостей представленных факторов дает возможность оценить степень риска для каждой зоны подтопления с целью принятия решений о предупреждении негативных процессов или ликвидации их последствий.

В связи с недостатком геологической информации необходимо применять комплексный анализ данных контактных и дистанционных методов зондирования Земли для установления аналитических зависимостей факторов подтоплений.

При невозможности количественно оценить степень влияния каждого фактора на процесс подтопления, необходимо применять экспертные оценки для получения наиболее эффективного метода локализации зон возможных подтоплений.

Список литературы

1. Подтопление в населенных пунктах Харьковской области [Текст] / Г.Г. Стрижельчик, Ю.П. Соколов, И.А. Гольдфельд, А.Ю. Чебанов, Н.С. Николаенко. – Х., 2003. – 160 с.
2. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH [Текст] / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
3. Максимов В.М. Справочное руководство гидрогеолога. Издание третье, переработанное и дополненное [Текст] / В.М. Максимов – Л.: Недра, 1979. – Т. 1. – 512 с.
4. Биндеман Н.Н. Гидрогеологические расчеты подпора грунтовых вод и фильтрация из водохранилищ [Текст] / Н.Н. Биндеман. – М.: Углетехиздат, 1951. – 73 с.
5. СНиП 2.06.15-85. Инженерная защита территорий от затопления и подтопления [Текст]. – Введ. 1986-07-01. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1974. – 24 с.
6. Yakovlev V.V. Rising groundwater levels in Northern-Eastern Ukraine: hazardous trends in urban areas [Текст] / V.V. Yakovlev, L.P. Svirenko, O.Y. Chebanov, O.I. Spirin // Current problems of Hydrogeology of Urban Areas: Urban Agglomerates and Industrial Centres. – Eorerecht: Kluwer Academic Publisher, 2002. – P. 221-241.
7. Рябых В.А. Влияние эксплуатации подземных вод на условия подтопления городской территории на примере г. Харькова [Текст] / В.А. Рябых, В.В. Яковлев, В.А. Белокопытова // Вісник Будинку економ. та наук.-техн. знань. – К., 1998. – Вип. 9. – С. 42-45.

Поступила в редколлегию 19.02.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.М. Фык, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Харьков.

ВИЗНАЧЕННЯ ЗОН МОЖЛИВИХ ПІДТОПЛЕНЬ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНОЇ АПРІОРНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

С.І. Горелик

Проведена оцінка ступеня впливу чинників підтоплення на основі побудови графіків функції приналежності. Аналіз зроблений по наступних чинниках: перевищення над рівнем ріки, глибина залягання водотривкого шару та експлуатація мело-мергельного водоносного горизонту. Залежності отримані за результатами обробки узагальненої геологічної інформації й даних бурових свердловин. Приведені результати дозволяють точніше локалізувати зони підтоплення і ступень їх підтопленості, а також оперативно приймати заходи по запобіганню негативних наслідків процесів підтоплення.

Ключеві слова: підтоплення підземними водами, функції приналежності нечітких множин, водотривкий шар, мело-мергельний водоносний горизонт, перевищення над рівнем ріки.

DETERMINATION AREAS OF POSSIBLE UNDERFLOODING IN THE CONDITIONS OF LIMITED A PRIORI INFORMATION

S.I. Gorelik

The estimation of degree of influence factors of underflooding on the basis on plot membership is spent. An analysis are produced on the followings factors: exceeding above the level of the river, depth of occurrence the waterproof layer and exploitation of chalk-marly aquiferous horizon. Dependences are got on results treatment of the generalized geological information and these drillholes. The received results allow more exactly localized the areas of underflooding and degree of underflooding, and also operatively to take measures on warning of negative consequences processes of underflooding.

Keywords: underflooding, functions of belonging of fuzzy sets, waterproof layer, chalk-marly aquiferous horizon, exceeding above the level of the river underwaters.