

УДК 528.88+556.3

С. И. ГОРЕЛИК

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

НЕЧЕТКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОН ВОЗМОЖНЫХ ПОДТОПЛЕНИЙ ПРИ РАЗНЫХ РЕЖИМАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЕРХНЕМЕЛОВОГО ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТА ПО ДАННЫМ КОНТАКТНЫХ И ДИСТАНЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В статье рассмотрена актуальность создания геомодели подтопления грунтовыми водами г. Харькова. Рассмотрены основные естественные и техногенные факторы, вызывающие подтопление. Применен алгоритм Мамдани для оценки взаимодействия основных факторов. Представлены картографические геомодели подтопления при разных режимах эксплуатации верхнемелового водоносного горизонта по степени риска. Получены прогнозные функции площадей развития подтопления методом нелинейного регрессионного анализа. На основе получения прогнозных оценок в условиях недостаточной априорной информации оценено влияние режима эксплуатации верхнемелового водоносного горизонта на изменение геометрических характеристик зон возможных подтоплений.

Ключевые слова: геомодель, дистанционные методы, подтопление, верхнемеловой водоносный горизонт, SRTM, регрессионный анализ.

Введение

Актуальной ежегодно возрастающей проблемой г. Харькова является подтопление грунтовыми водами. Так, на начало 2000^x гг. подтопленными являются 90,7 км², а площадь территорий подверженных подтоплению составляет 110 км², что составляет, соответственно, 25,9% и 31,4% от площади города [1].

Неглубокое залегание грунтовых вод в пределах территории города обусловлено как природными, так и техногенными факторами. Естественные факторы, приводящие к подтоплению, связаны с геоморфологическим, геологическим и гидрогеологическим строением территории, а также климатическими особенностями местности. Главной предпосылкой, обуславливающей возникновение подтопления, является расположенность большей части города в пониженных участках речных долин (рис.1а). По результатам статистического анализа буровых учетных карточек [2] были построены функции принадлежности вероятности возникновения подтопления по двум факторам: превышение над уровнем водотока и глубина залегания водонепроницаемого слоя.

Особенности геологического и гидрогеологического строения г. Харькова

Геологическое строение, гидрогеологические особенности распространения и залегания водонос-

ных горизонтов и водоупорных толщ привели к подпору грунтовых вод напорным верхнемеловым (мело-мергельным) водоносным горизонтом (ММВГ) [3]. Дополнительное питание грунтовых вод ММВГ осуществляется в зонах, где напор подземных вод превышает их уровень. Такие условия возникают в пойме рр. Уды, Лопань, Харьков, а также на низких террасах. Для данных участков характерно следующее гидрогеологическое строение. Первый от поверхности – аллювиальный водоносный горизонт голоценовой поймы или верхнеплейстоценовых террас (витачевско-бугская, прилукско-удайская) мощностью от 5 до 15 м. Ниже залегает обуховско-межигорский водоносный горизонт, который размыт под поймами рек, кроме южной части г. Харькова. Первым от поверхности региональным водоупором является толща мергелей и мергелистых глин киевской свиты, мощностью от 10-11 м в северной части до 15-25 м в южной, юго-западной части города. На водоупорной толще залегает обуховско-межигорский водоносный горизонт, кроме пойменных участков центральной, западной и северной части города или аллювиальный водоносный горизонт. В результате позднечетвертичного размыва в северо-западной и северо-восточной части под поймами рр. Лопань и Харьков киевские отложения полностью размыты. Ниже повсеместно залегает каневско-бучакский водоносный горизонт, который в центральной и северной части г. Харькова залегает на ММВГ. В южной и юго-западной части города в долине рр. Уды и Лопань распространен

- R₈: if F_s is H & F_{Cdl} is L & if F_e is M then Un is B,
- R₉: if F_s is H & F_{Cdl} is L & if F_e is L then Un is B,
- R₁₀: if F_s is M & F_{Cdl} is H & if F_e is H then Un is E,
- R₁₁: if F_s is M & F_{Cdl} is H & if F_e is M then Un is E,
- R₁₂: if F_s is M & F_{Cdl} is H & if F_e is L then Un is B,
- R₁₃: if F_s is M & F_{Cdl} is M & if F_e is H then Un is B,
- R₁₄: if F_s is M & F_{Cdl} is M & if F_e is M then Un is M,
- R₁₅: if F_s is M & F_{Cdl} is M & if F_e is L then Un is P,
- R₁₆: if F_s is M & F_{Cdl} is L & if F_e is H then Un is M,
- R₁₇: if F_s is M & F_{Cdl} is L & if F_e is M then Un is P,
- R₁₈: if F_s is M & F_{Cdl} is L & if F_e is L then Un is S,
- R₁₉: if F_s is L & F_{Cdl} is H then Un is E,
- R₂₀: if F_s is L & F_{Cdl} is M then Un is P,
- R₂₁: if F_s is L & F_{Cdl} is L then Un is S.

Второй этап заключался в фазификации входных переменных. Моделирование осуществлено для трех режимов эксплуатации ММВГ: низкий уровень водоотбора 10 тыс. м³/сут, средний – 30 тыс. м³/сут и высокий 50 тыс. м³/сут (рис. 2). На следующем этапе производилось агрегирование подусловий в нечетких правилах продукций. Для нахождения степени истинности условий использована операция логической конъюнкции:

$$T(F_s \wedge F_{Cdl} \wedge F_e) = \min \{T(F_s) \wedge T(F_{Cdl}) \wedge T(F_e)\},$$

где T – весовой коэффициент фактора.

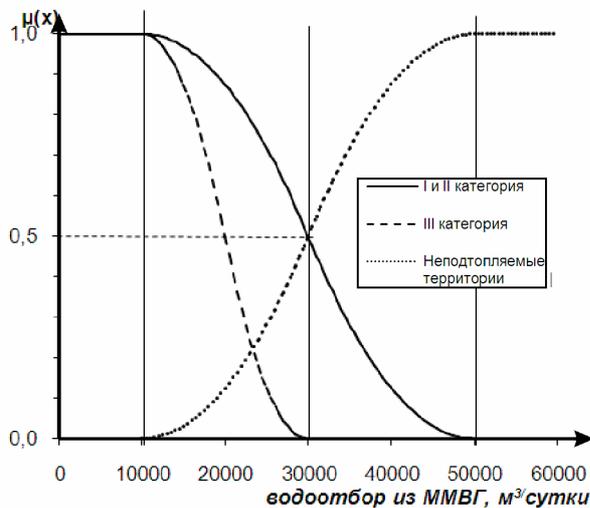


Рис. 2. График функции принадлежности качественных термов в зависимости от водоотбора из ММВГ

Правила, степень истинности которых выше нуля, использованы для дальнейших расчетов.

Далее проведена активизация подзаключений для всех активных правил нечетких продукций с помощью метода min-активизации нечеткой композиции. На предпоследнем этапе произведена аккумуляция заключений нечетких правил продукций. Последний этап заключается в дефазификации выходных переменных методом центра тяжести [4]:

$$y = \frac{\int_{\text{Min}}^{\text{Max}} x \cdot \mu(x) dx}{\int_{\text{Min}}^{\text{Max}} \mu(x) dx},$$

где y – результат дефазификации.

С помощью алгоритма Мамдани были определены степени опасности подтопления для всех возможных комбинации факторов при водоотборах из ММВГ – 10, 30 и 50 тыс. м³/сут. Для разных режимов эксплуатации водоносного горизонта были созданы три картографические геомодели вероятности возникновения подтопления по категориям опасности. Исходные данные для определения превышений над уровнем водотока (рис. 1б) получены из бесплатного архива дистанционных данных SRTM [5].

По полученным картографическим геомоделям (рис. 3а-3в) определены площади подтопленных и потенциально подтопляемых территорий при помощи программы ArcGIS. Результаты моделирования приведены в табл. 1.

Для прогнозирования изменения геометрических характеристик зон возможных подтоплений определена площадь распространения ММВГ в пределах г. Харькова, которая составляет 157,3 км².

Прогнозирование развития процессов подтопления осуществлено при помощи нелинейной (полиномиальной) регрессии [6], которая имеет следующий вид:

$$S = a + b \cdot x + c \cdot x^2,$$

где S – прогнозная площадь;

x – водоотбор из ММВГ, м³/сут;

a, b, c – коэффициенты, определяемые статистически [7].

Таблица 1

Площадь распространения подтопленных и потенциально подтопляемых территорий при разных режимах эксплуатации ММВГ по данным моделирования

Режим эксплуатации ММВГ	Водоотбор из ММВГ, м ³ /сутки	Подтопленные территории, км ²	Потенциально подтопляемые территории, км ²
Низкий	10000	46,2	55,0
Средний	30000	32,1	69,1
Высокий	50000	24,9	76,3

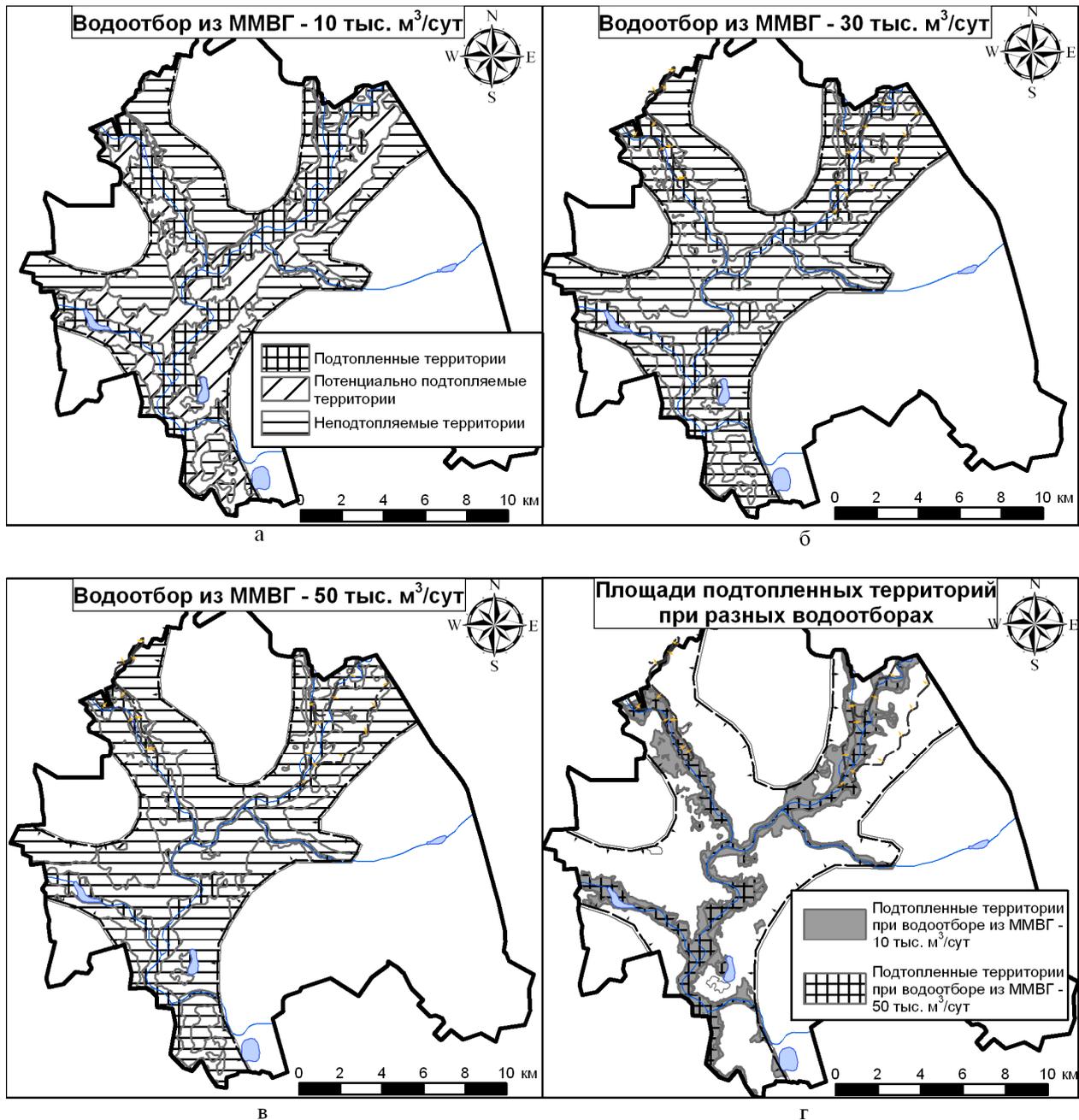


Рис. 3. Картографические геомодели подтопления по степени опасности г. Харькова при разных режимах водоотбора из ММВГ:
 а – при водоотборе из ММВГ – 10 тыс. м³/сут; б – при водоотборе из ММВГ – 30 тыс. м³/сут;
 в – при водоотборе из ММВГ – 50 тыс. м³/сут; г – сравнительная модель при водоотборах 10 и 50 тыс. м³/сут;

В результате моделирования получены прогнозные функции:

а) изменения площади подтопленных территорий:

$$S_{\text{п}} = 55,96 - 0,0011x + 9 \cdot 10^{-9} x^2;$$

б) изменения площади потенциально подтопленных территорий:

$$S_{\text{пп}} = 46,11 + 0,001x - 8 \cdot 10^{-9} x^2.$$

На рисунке 4 представлены прогнозные зависимости изменения площади подтопленных и потенциально подтопленных территорий от водоотбора из ММВГ.

В зону неподтопляемых территорий входят участки с превышением более 17 м над уровнем реки. Данные территории относятся к высоким тер-

расам и водоразделам, на которые влияние ММВГ не распространяется, в связи с чем при разных режимах эксплуатации площадь данных территорий постоянна – 56,1 км².

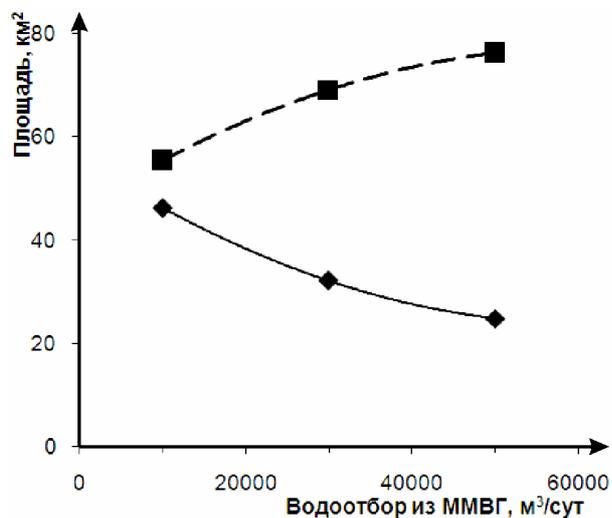


Рис. 4. Прогнозные зависимости площадей подтопленных и потенциально подтопляемых территорий от режима эксплуатации ММВГ:

◆ – подтопленные территории;
 ■ – потенциально подтопляемые территории;
 ——— – полиномиальная (подтопленные территории);
 - - - - - – полиномиальная (потенциально подтопляемые территории)

Выводы

Увеличение вододобора с 10 до 30 тыс. м³/сут приведет к сокращению площади подтопления на 30,5%, а при эксплуатации ММВГ на уровне 50 тыс. м³/сут зона подтопления уменьшится на 46,1%. Возобновление эксплуатации ММВГ в среднем режиме позволит сэкономить порядка 21 млн. грн на ликвидацию последствий от подтопления, а при высоком уровне – более 30 млн. грн [8].

Следует отметить, что снижение УГВ начнется после определенного периода эксплуатации ММВГ. Более детальное прогнозирование требует использования топографических карт масштаба 1:25 000 и

крупнее. Данные SRTM имеют погрешность, связанную с характером подстилающей поверхности. Для усовершенствования геомодели возможно использование данных тематического дешифрирования аэро- и космических снимков.

Литература

1. Подтопление в населённых пунктах Харьковской области [Текст] / Г. Г. Стрижельчик, Ю. П. Соколов, И. А. Гольдфельд [и др.] – Х., 2003. – 160 с.
2. Горелик, С. И. Определение зон возможных подтоплений в условиях ограниченной априорной информации [Текст] / С. И. Горелик // Системы обработки информации : сб. науч. пр. / Харк. ун-т Повітр. сил ім. Івана Кожедуба. – Х., 2014. – Вып. № 118. – С. 258-262.
3. Бабаенко, В. Д. Исследование влияния режима эксплуатации мело-мергельного водоносного горизонта на подтопление территории г. Харькова [Текст] / В. Д. Бабаенко // Вестник Харьк. ун-та : Мат-лы по геол., гидрогеол. и географии Левобер. Украины. – Х., 1982. – Вып. 228. – С. 27-29.
4. SRTM 90m Digital Elevation Data [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://dds.cr.usgs.gov/srtm>. – 12.03.2014,
5. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH [Текст] / А. В. Леоненков. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
6. Афанасьев, В. Н. Анализ временных рядов и прогнозирование. [Текст] / В. Н. Афанасьев, М. Ю. Юзбашев. – М. : Финансы и статистика, 2001. – 228 с.
7. Сизова, Т. М. Статистика: Учебное пособие [Текст] / Т. М. Сизова. – СПб. : СПб ГУИТМО, 2005. – 80 с.
8. Сташук, В. А. Концепция водной стратегии Украины [Текст] / В. А. Сташук, М. И. Ромащенко, Ю. О. Михайлов // Водное хозяйство и интегрированное управление водными ресурсами в странах ВЕКЦА : проблемы и решения : сб. научн. трудов / Научно-информационный центр Межгосударственной координационной водохозяйственной комиссии Центральной Азии. – Ташкент, 2012. – Вып. № 13. – С. 29-36.

Поступила в редакцию 12.03.2014, рассмотрена на редколлегии 11.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. минералогии, петрографии и полезных ископаемых И. М. Фык, Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина.

**НЕЧІТКЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗОН МОЖЛИВИХ ПІДТОПЛЕНЬ ПРИ РІЗНИХ РЕЖИМАХ
ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВЕРХНЬОКРЕЙДЯНОГО ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТУ ПО ДАНИМ
КОНТАКТНИХ І ДИСТАНЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

С. І. Горелик

У статті розглянуто актуальність створення геомоделі підтоплення ґрунтовими водами м. Харкова. Розглянуто основні природні і техногенні чинники, що викликають підтоплення. Застосовано алгоритм Мамдані для оцінки взаємодії основних чинників. Представлено картографічні геомоделі підтоплення при різних режимах експлуатації верхньокрейдяного водоносного горизонту по ступеням ризику. Отримано прогнозні функції площ розвитку підтоплення методом нелінійного регресійного аналізу. На основі здобутих прогнозних оцінок в умовах недостатньої апріорної інформації оцінено вплив режиму експлуатації верхньокрейдяного водоносного горизонту на зміну геометричних характеристик зон можливих підтоплень.

Ключеві слова: геомодель, дистанційні методи, верхньокрейдяний водоносний горизонт, SRTM, регресійний аналіз.

**FUZZY DESIGN OF POSSIBLE AREAS UNDERFLOODING AT DIFFERENT
EXPLOITATION MODES OF UPPER CRETACEOUS AQUIFEROUS SOFTWARE
BY INFORMATION OF CONTACT AND CONTROLLED FROM DISTANCE RESEARCHES**

S. I. Gorelik

In the article is considered actuality of creation Kharkovs model underflooding. Basic natural and tecnogenic factors, defiant underflooding, are considered here. The Mamdani's algorithm is applied for the estimation of cooperation basic factors. Cartographic geomodels underflooding is presented at the different modes of exploitation of upper cretaceous aquiferous burn-umbrella by the degree of risk. There are get the prognosis functions the areas development of underflooding by not-linear regressive analysis method. On the basis receipt of prognosis estimations in the conditions of a priori insufficient information influence of the mode exploitation of upper cretaceous aquiferous horizon is appraised on the change of geometrical descriptions of areas the possible underflooding.

Key words: geomodel, distance methods, underflooding, upper cretaceous aquiferous horizon, SRTM, regressive analysis.

Горелик Станислав Игоревич – ассистент кафедры производства радиотехнических систем летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: stas_gor@ukr.net.