

Н. К. Парамонова, И. Н. Запольский, Р. Б. Гаврилюк

РАСЧЕТ ИНТЕНСИВНОСТИ ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО ПИТАНИЯ И ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ ПО ДАННЫМ ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗАВИСИМОСТИ van GENUCHTEN

(Рекомендовано д-ром геол.-минерал. наук Н. С. Огняником)

Запропоновано метод розрахунку інтенсивності інфільтраційного живлення та ємнісних властивостей ґрунтів за даними зміни рівня ґрунтових вод з використанням залежності van Genuchten, який продемонстровано на даних забрудненої нафтопродуктами ділянки аеродрому Кульбакине (м. Миколаїв).

The method for calculation of infiltration rate and soil capacitive properties by groundwater level changes using the van Genuchten function is presented. This method is demonstrated at the oil contaminated area of Kulbakino airfield (Nikolaev city).

Введение

Знание величины инфильтрационного питания или его интенсивности в отдельные периоды времени необходимо для прогнозных расчетов подъема уровня грунтовых вод (УГВ), вымыва и растворения в зоне аэрации и переноса в грунтовые воды солей и загрязняющих веществ, в том числе нефтепродуктов.

Известно много методов определения интенсивности питания грунтовых вод. Изучение баланса грунтовых вод или влаги в зоне аэрации [1] позволяет оценить осредненное инфильтрационное питание для однородного с точки зрения условий питания, фильтрации или влагопереноса участка. Использование дискретных моделей потока дает возможность увеличить количество таких участков. Этот метод трудоемкий, так как требует большого объема экспериментальных определений литологического состава и фильтрационных свойств пород, режима УГВ на границах и по площади участка, а также элементов водного баланса (атмосферные осадки, испарение, поверхностный сток, изменение запасов влаги в зоне аэрации и т. д.).

Наиболее надежными являются прямые методы определения инфильтрационного питания в полевых условиях с помощью лизиметров-балансометров, минимигрометров, изучения гидрофизическим методом

влагопереноса в зоне аэрации [4]. Но они применимы только для условий, аналогичных постановке экспериментов (пространства и времени), достаточно трудоемки и долговременны. Применение косвенного гидрохимического метода [4] позволяет оценить региональное среднесуточное значение инфильтрационного питания. В условиях равенства притока и оттока грунтовых вод величина инфильтрационного питания (W) за время Δt определяется по формуле:

$$W = \Delta h \mu, \quad (1)$$

где Δh – изменение УГВ за время Δt ; μ – недостаток водонасыщения при подъеме уровня или водоотдача при его опускании, а интенсивность инфильтрационного питания:

$$\omega = \frac{W}{\Delta t} = V_n \mu, \quad (2)$$

где $V_n = \Delta h / \Delta t$ – скорость изменения УГВ.

Несмотря на простоту, недостатком данного метода является неоднозначность в определении μ , которое зависит не только от литологического состава, но и от глубины залегания и скорости изменения УГВ [3].

В формулах (1) и (2) μ представляет собой изменение удельных запасов влаги (ΔZ) как в зоне колебания УГВ (Δh), так и в вышележащей толще зоны аэрации, отнесенное к изменению УГВ (Δh):

$$\mu = \frac{\Delta Z}{\Delta h}. \quad (3)$$

На практике используются значения μ , полученные экспериментальным путем или

принятые по аналогии, не принимая во внимание скорость изменения УГВ. Полевые эксперименты связаны с наливом или откачкой воды из водоносного горизонта грунтовых вод, которые проводятся так, чтобы была возможность учесть боковой отток или пренебречь им. Лабораторные эксперименты проводят путем определения объема воды, ушедшего на насыщение или полученного при обезвоживании монолита грунта определенного объема. Если в полевых экспериментах в поданный или откачанный объем воды входит объем, ушедший/поступивший из/в зоны аэрации, то при лабораторных экспериментах взаимосвязь грунтовых вод с зоной аэрации отсутствует.

Из приведенного следует, что при расчетах чаще всего используются фиктивные значения μ , не соответствующие конкретному пространственному и временному расположению УГВ.

1. Теоретическое обоснование

Зависимость van Genuchten (VG) [5] определяет взаимосвязь между насыщенностью воды и капиллярным напором:

$$\bar{\theta} = \left[1 + (\alpha h_c)^\varepsilon \right]^{-m}, \quad (4)$$

где $\bar{\theta} = \frac{\theta - \theta_{w,r}}{\theta_s - \theta_{w,r}}$ – относительная насыщенность воды; θ – объемное содержание воды в грунте; θ_s – полное объемное содержание воды в грунте (для процесса впитывания вместо θ_s используется θ_i – максимальное содержание воды в грунте); $\theta_{w,r}$ – остаточное содержание воды в системе "вода – воздух"; h_c – капиллярный напор; α , ε – параметры, характеризующие форму кривой основной ветви дренирования (ОВД) (α^d) и основной ветки впитывания (ОВВ) (α^i); $m = 1 - 1/\varepsilon$.

Поскольку капиллярный напор в точке определяется высотой ее расположения над УГВ, то он будет изменяться синхронно с изменением УГВ. Соответственно по формуле (4) можно рассчитать изменение содержания воды в любой точке в связи с подъемом или опусканием УГВ.

Во время подъема УГВ происходит процесс впитывания воды в грунты зоны аэра-

ции, а во время опускания – процесс их дренирования. Поэтому для расчета θ необходимо знать α^d , ε^d и α^i , ε^i для всех грунтов зоны аэрации, вовлеченных в процесс влагопереноса. Они определяются аппроксимацией зависимостью VG экспериментальных замеров $\theta-h_c$ от θ_s при $h_c = 0$ до $\theta_{w,r}$ при $h_c \rightarrow \infty$ в процессе ОВД (α^d , ε^d) и от $\theta_{w,r}$ до θ_i при $h_c = 0$ в процессе ОВВ (α^i , ε^i). Более подробно этот процесс описан в монографии [2].

В результате расчетов получают изменение объемного содержания воды за время Δt на УГВ и в трех-четырех точках начальной и вновь сформировавшейся капиллярной каймы:

$$\Delta\theta = \theta_k - \theta_n, \quad (5)$$

где θ_k , θ_n – объемное содержание воды на конечный и начальный моменты времени Δt .

Изменение запасов воды по профилю находится по формуле:

$$\Delta Z = \sum_1^n \Delta\theta_{cp} \times \delta, \quad (6)$$

где $\Delta\theta_{cp} = \frac{\Delta\theta_i + \Delta\theta_{i-1}}{2}$ – среднее изменение

влагосодержания между расчетными точками по профилю; δ – расстояние между расчетными точками по профилю.

В периоды резкого подъема УГВ (зимне-весеннее снеготаяние) разницей притока и оттока грунтовых вод в суглинистых отложениях можно пренебречь, а изменение запасов грунтовых вод отнести за счет инфильтрационного питания. Тогда интенсивность инфильтрации будет равна интенсивности изменения запасов:

$$\omega = \frac{\Delta Z}{\Delta t}, \quad (7)$$

а недостаток насыщения:

$$\mu = \frac{\omega}{V_h}. \quad (8)$$

В период (летне-осенний) резкого снижения УГВ преобладают боковые притоки-оттоки и/или перетекание в нижележащий водоносный горизонт, для определения которых часто нет данных, а инфильтрационное питание может быть незначительным или даже при близком залегании УГВ (1–2 м) – отрицательным. Поэтому по изме-

нению запасов можно определить по формуле (3) только величину водоотдачи.

2. Определение интенсивности инфильтрационного питания и емкостных свойств грунтов в пределах аэродрома Кульбакино (г. Николаев)

2.1. Общие положения

Аэродром Кульбакино расположен на южной окраине г. Николаев. Территория относится к северной части Причерноморской низменности и водораздельному плато между реками Южный Буг и Ингул.

Первый от поверхности земли водоносный горизонт грунтовых вод приурочен к верхне-среднечетвертичным золово-делювиальным суглинкам. Уровни грунтовых вод зафиксированы на глубинах 3–10 м. Питание происходит вследствие инфильтрации атмосферных осадков. Разрез суглинистой толщи достаточно выдержан: до глубины 2,5 м залегают суглинки средние, ниже в интервале глубин 2,5–4,5 м – суглинки легкие, затем до глубины 9,0 м – суглинки средние, подстилающиеся двухметровым слоем суглинка легкого, ниже которого залегают суглинки тяжелые.

Мониторинг УГВ проводился для отслеживания изменения структуры потока грунтовых вод с целью установления пути миграции утерянных легких нефтепродуктов. Расчет интенсивности инфильтрации необходим для исследования скорости растворения захваченных в зоне аэрации нефтепродуктов и возможности их выноса в виде эмульсии. Кроме того, знание инфильтрации и недостатка водонасыщения (водоотдачи) необходимо для создания модели гидрогеологических условий, проведения моделирования распространения нефтепродуктового загрязнения и проектирования санационных мероприятий.

Для расчета взяты данные мониторинга УГВ по девяти скважинам с сентября 2002 г.

по ноябрь 2005 г. и по 13 скважинам с октября 2003 г. по ноябрь 2006 г. Для получения максимальной интенсивности инфильтрации использованы величины подъема УГВ в зимне-весенний период, по которым также определен недостаток водонасыщения, а по летне-осеннему снижению УГВ рассчитана водоотдача грунтов.

Параметры зависимости VG приняты на основе лабораторных исследований для условий подъема УГВ (впитывания) и для условий снижения УГВ (дренирования), которые приведены в табл. 1.

2.2. Пример расчета

Приведен расчет по скв. 2м, в которой с 30.10.2002 г. по 18.04.2003 г. УГВ поднялся на 65 см в суглинках легких с глубины 430 см до глубины 365 см за 170 сут.

Изменение влагозапасов рассчитано в интервале подъема УГВ и в зоне изменения влажности в переформировавшейся капиллярной кайме: в легких суглинках это 2–3 м, а в средних – 3–4 м. Рассчитано объемное содержание воды θ_w на начальный и конечный моменты времени для глубин, отражающих изменение УГВ и переход капиллярной каймы из одной литологической разности в другую. Так, подъем УГВ произошел в легком суглинке. На глубине 430 см он оставался все время насыщенным с $\theta_w = \theta_s = 0,360$ при капиллярном напоре $h_c = 0$. На глубине 365 см после подъема УГВ ($\Delta h = 65$ см) в конечный момент времени суглинок легкий также стал насыщенным с $\theta_w = \theta_s = 0,360$. Но на 30.10.2002 г. он был еще ненасыщенным, и влага имела капиллярный напор, соответствующий расстоянию от начального УГВ = 430 см, т. е. $430 - 365 = 65$ см. Произведены расчеты по шести точкам (рис. 1), расположенным как в легком суглинке, так и в верхнем слое суглинка среднего. Результаты расчета приведены в табл. 2 и на рис. 1.

Таблица 1. Значения параметров зависимости VG, принятые для расчетов

Грунты	θ_s	$\theta_{w,r}$	α^d	ε^d	m^d	θ_i^m	α^i	ε^i	m^i
Суглинок легкий	0,412	0,124	0,02218	2,1596	0,5370	0,360	0,03296	1,966	0,4914
Суглинок средний (верхний)	0,488	0,229	0,008196	2,9782	0,6642	0,446	0,0120	2,352	0,5750
Суглинок средний (нижний)	0,520	0,210	0,006372	2,7888	0,6414	0,480	0,00933	2,4488	0,5916

Таблица 2. Результаты расчета интенсивности инфильтрационного питания (ω) и недостатка водонасыщения (μ) по подъему УГВ в скв. 2м

h_n , см	430						
h_k , см	365						
Δh , см	65						
Δt , сут	170						
№ точки расчета	1	2	3	4	5	6	
грунт	с. л.	с. л.	с. л.	с. с. ^в	с. с. ^в	с. с. ^в	
$h_{сн}$, см	0	65	180	200	300	400	
$h_{ск}$, см	0	0	115	135	235	335	
θ_n , дол. ед.	0,360	0,2264	0,1656	0,2910	0,2663	0,2546	
θ_k , дол. ед.	0,360	0,360	0,1869	0,3253	0,2799	0,2614	
$\Delta\theta$, дол. ед.	0	0,1336	0,0213	0,0343	0,0136	0,00672	
$\Delta\theta_{ср}$, дол. ед.	0,0668		0,0775	0,028	0,024	0,01135	$\Sigma\Delta Z = 17,212$ $= 17,212$
δ , см	65		115	20	100	100	
ΔZ , см	4,343		8,908	0,556	2,3920	1,0135	
ω , см/сут	0,1012						
v , см/сут	0,3824						
μ , дол. ед.	0,265						

Примечание: h_n – начальная глубина залегания УГВ; h_k – конечная глубина залегания УГВ; Δh – высота подъема УГВ; Δt – время подъема УГВ; с. л. – суглинок легкий; с. с.^в – суглинок средний верхний; $h_{сн}$ – начальный капиллярный напор в точке: превышение над h_n ; $h_{ск}$ – конечный капиллярный напор в точке: превышение над h_k ; θ_n , θ_k – начальное и конечное объемное влагосодержание, рассчитывается по формуле (4); параметры α , ε , m взяты из табл. 1 для процесса выпитывания; $\Delta\theta = \theta_k - \theta_n$ – изменение (прирост) влагосодержания; $\Delta\theta_{ср} = (\Delta\theta_i + \Delta\theta_{i-1})/2$ – среднее изменение влагосодержания между расчетными точками; δ – расстояние между расчетными точками; $\Delta Z = \Delta\theta_{ср}\delta$ – изменение удельных запасов влаги; $\omega = \Sigma\Delta Z/\Delta t$ – интенсивность инфильтрационного питания; $v = \Delta h/\Delta t$ – скорость подъема УГВ; $\mu = \omega/v$ – недостаток водонасыщения.

2.3. Анализ результатов расчетов

Определено 40 значений интенсивности инфильтрационного питания в зимне-весенний период по 22 скважинам с 2002 г. по 2006 г. Полученные значения, сгруппированные по годам, нанесены на график (рис. 2) в зависимости от средней глубины залегания УГВ $((h_n + h_k)/2)$. В результате получено "облако" точек, снижающееся с глубиной залегания УГВ от 0,28 до 0,045 см/сут. Такая же закономерность прослеживается и по отдельным годам, несмотря на то, что с глубиной (более 3 м) интенсивность инфильтрации несет отпечаток атмосферных осадков предыдущих лет. Так, интенсивность инфильтрации в самый засушливый период 2002–2003 гг. ($\Sigma A = 111$ мм – сумма атмосферных осадков в зимне-весенний период) находится в верхней части "облака" при глубине 6,5 м, неся на себе отпечаток предыдущих более влажных перио-

дов. Этот период, в свою очередь, сказывается на глубине более 9 м в низкой интенсивности инфильтрации в 2005–2006 гг. (0,015 см/сут) с большей суммой атмосферных осадков (144 мм), в то время как в период 2003–2004 гг. интенсивность инфильтрации на этой глубине составила 0,035–0,055 см/год. При глубине залегания УГВ 2–4 м в зимне-весенний период с 2002 г. по 2006 г. прослеживается близкая интенсивность инфильтрации (0,14 см/сут).

Интенсивность естественного инфильтрационного питания до глубины 2,5 м сильно зависит от изменения количества атмосферных осадков в зимне-весенний период, изменяясь в 4 раза (от 0,07 до 0,28 см/сут). С глубиной это влияние уменьшается, и уже на 6 м ω изменяется в 2 раза (0,025–0,05 см/сут); на глубинах более 9 м изменение ω составляет сотые доли см/сут. Подобная закономерность зафиксирована полевыми экспериментальными измерениями [4].

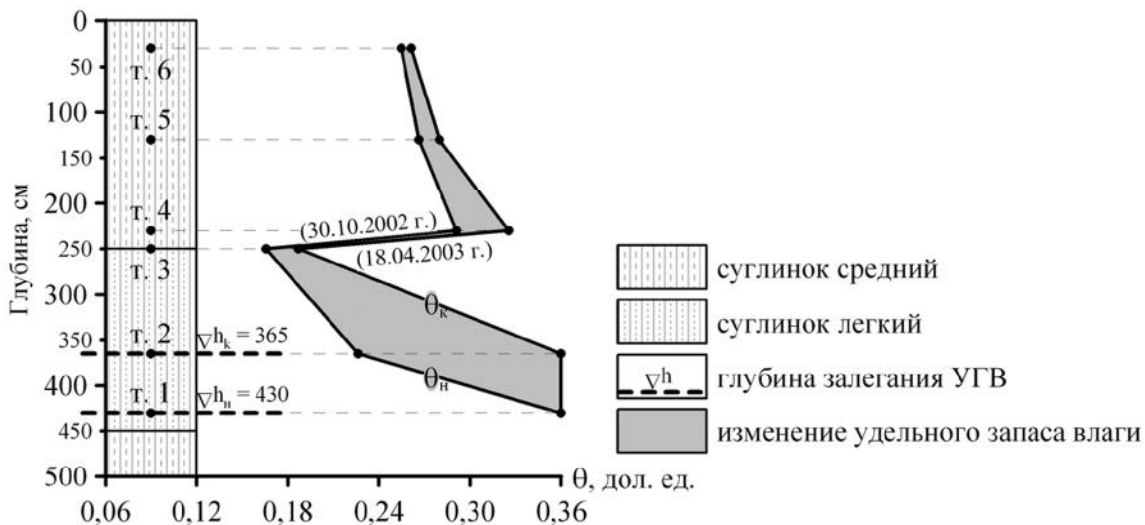


Рис. 1. Изменение рассчитанных влагосодержания и удельного запаса влаги при подъеме УГВ в скв. 2м

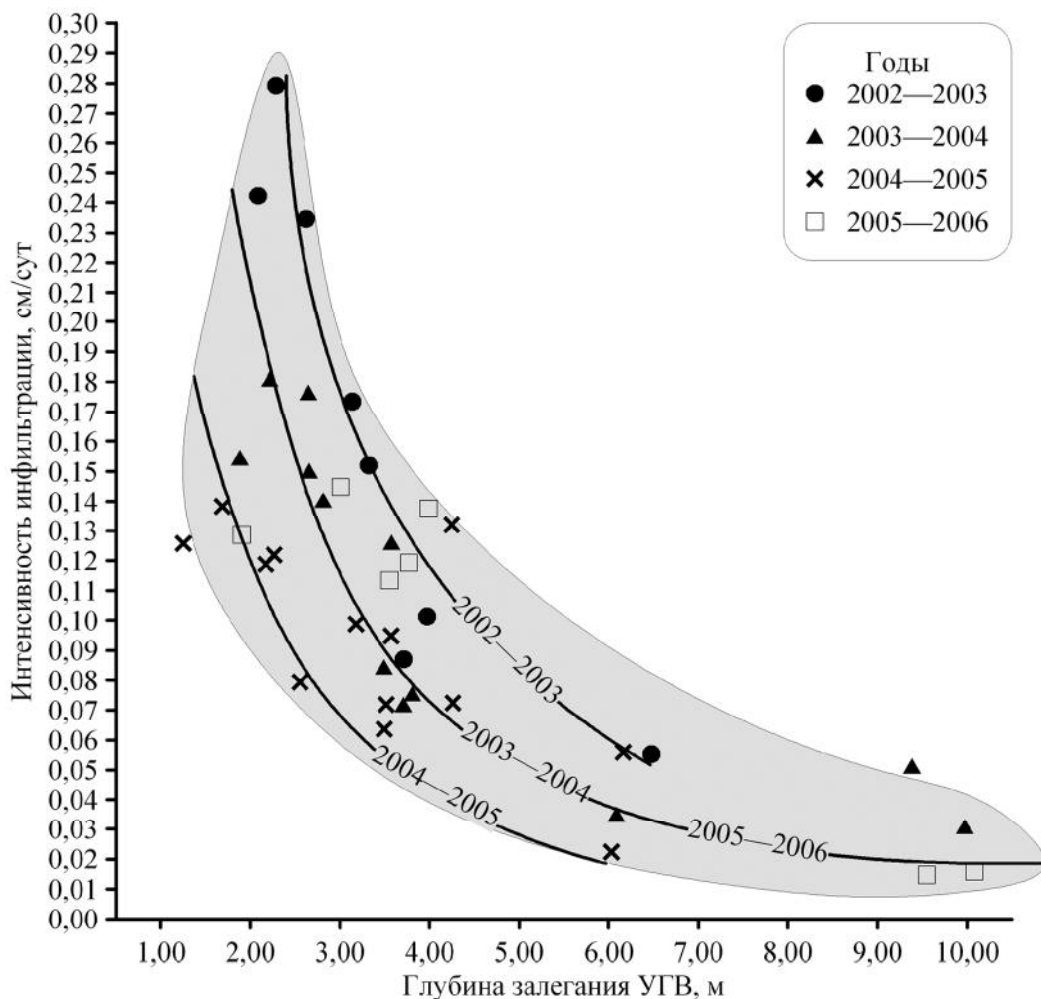


Рис. 2. Изменение рассчитанной интенсивности инфильтрации в зимне-весенний период

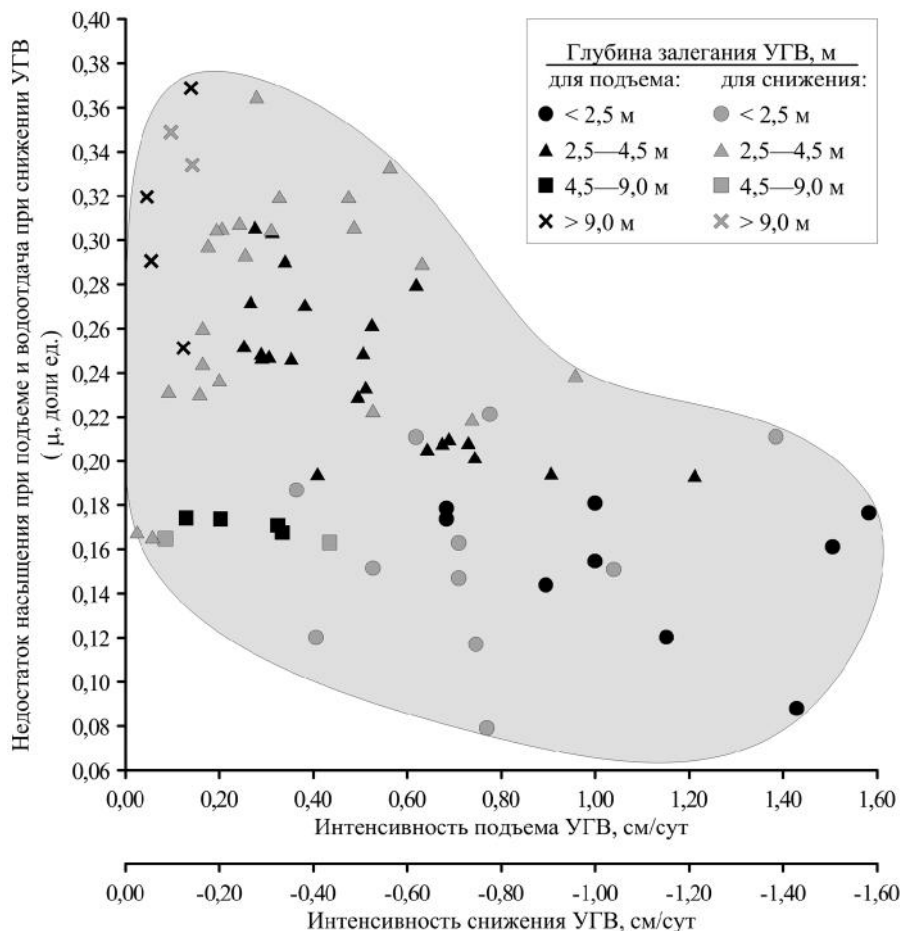


Рис. 3. Изменение рассчитанных недостатка водонасыщения и водоотдачи грунтов по данным колебания УГВ

Выполнено также 40 расчетов недостатка водонасыщения в период зимне-весеннего подъема УГВ и 38 расчетов водоотдачи в период летне-осеннего снижения УГВ. Полученные значения как недостатка насыщения, так и водоотдачи нанесены на график (рис. 3) в зависимости от интенсивности подъема и снижения УГВ с учетом глубины его колебания. Сгруппированы интервалы колебания УГВ, которые происходят при глубинах: менее 2,5 м – в верхнем слое суглинка среднего; 2,5–4,5 м – в слое суглинка легкого; 4,5–9,0 м – в нижнем слое суглинка среднего; более 9,0 м – в нижнем слое суглинка легкого.

Как видно на рис. 3, точки также расположились в виде "облака" с уменьшением значений от 0,37 до 0,08 по мере увеличения интенсивности подъема или снижения УГВ. Это объясняется тем, что при быстром

подъеме или снижении УГВ влагоперенос происходит по более крупным порам, а при более медленном подъеме или снижении вовлекаются дополнительно более мелкие поры.

На рис. 3 прежде всего отмечается центральное и более компактное расположение точек, соответствующих значению недостатка водонасыщения. Их окружают точки более разбросанных значений водоотдачи. Несколько большие значения водоотдачи связаны с тем, что при понижении УГВ (дренировании) участвует больший объем пор, чем при подъеме (впитывании), когда происходит защемление воздуха.

При глубине залегания УГВ менее 2,5 м отмечены его колебания со скоростью 0,40–1,60 см/сут, что обусловило изменение водоотдачи от 0,22 до 0,08 при средних значениях 0,14–0,16. Следует отметить, что при

такой глубине капиллярная кайма в суглинках обычно выклинивается на поверхность земли и часть влаги может (особенно весной) испаряться и не участвовать в расчете.

В интервале 2,5–4,5 м изменение УГВ происходит в суглинке легком со скоростью от 0,1 до 0,9 см/сут. Нижняя часть капиллярной каймы формируется в суглинке легком, а верхняя – в суглинке среднем, что обусловило разброс водоотдачи от 0,17 до 0,36, а средние ее значения составляют 0,22–0,24.

При глубинах 4,5–9,0 м скорость подъема и опускания УГВ понижается до 0,1–0,4 см/сут. Как колебание уровня, так и формирование капиллярной каймы происходят в нижнем слое суглинка среднего, обуславливая очень стабильные значения недостатка водонасыщения и водоотдачи (0,16–0,17).

При глубине залегания УГВ ниже 9,0 м отмечается очень плавное его изменение со скоростью около 0,1 см/сут, что обусловило самые высокие значения емкостных свойств (0,29–0,37) со средним значением 0,33.

Выводы

1. Предложенный способ расчета интенсивности инфильтрационного питания и недостатка водонасыщения/водоотдачи учитывает изменение удельных влагозапасов не только в зоне колебания УГВ, но и в прилегающей капиллярной кайме. Он применим, когда боковым притоком/оттоком, а также перетеканием/испарением можно пренебречь.

2. Значения недостатка водонасыщения/водоотдачи изменяются для определенной литологической разности (в данном

примере суглинистой) в 5 раз (0,08–0,40) в зависимости от интенсивности подъема или спада УГВ. Поэтому использование в прогнозных расчетах постоянных величин приведет к значительным ошибкам.

3. Полученные значения максимальной интенсивности инфильтрационного питания будут использованы в дальнейшем при анализе скорости растворения и выноса в виде эмульсии нефтепродуктов, содержащихся в суглинистой зоне аэрации.

1. *Лебедев А. В.* Методы изучения баланса грунтовых вод. – М.: Гсгеолтехиздат, 1963. – 192 с.
2. *Огняник Н. С., Парамонова Н. К., Брикс А. Л. и др.* Основы изучения загрязнения геологической среды легкими нефтепродуктами. – К.: [А.П.Н.], 2006. – 278 с.
3. *Парамонова Н. К., Украинская А. Л.* Определение прогнозного инфильтрационного питания и емкостных свойств на орошаемых массивах путем моделирования влагопереноса // Передовой производственный и научно-технический опыт в мелиорации и водном хозяйстве, рекомендуемый для внедрения. – М.: ЦБНТИ Минводстроя СССР, 1990. – С. 11–15. – (Инф. сб; Вып. 4).
4. *Ситников А. Б.* Динамика влаги и солей в почвогрунтах зоны аэрации. – Киев: Наук. думка, 1986. – 151 с.
5. *Van Genuchten M. T., Nielsen D. R.* On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils // Soil Sci. Soc. Amer. J. – 1980. – Vol. 44(5). – P. 892–898.

Ин-т геол. наук НАН Украины,
Киев
E-mail: gwp_ign@gwp.org.ua

Статья поступила
11.08.10