

УДК 577.486

А.К. Балалаев, А.В. Котович

## ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ АБИОТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА РЕЖИМ ГРУНТОВЫХ ВОД В УСЛОВИЯХ СТЕПНОЙ ЗОНЫ ЛЕВОБЕРЕЖНОЙ УКРАИНЫ

О.К. Балаласв, О.В. Котович

*Дніпропетровський національний університет*

### ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ АБИОТИЧНИХ ФАКТОРІВ НА РЕЖИМ ГРУНТОВИХ ВОД В УМОВАХ СТЕПОВОЇ ЗОНИ ЛІВОБЕРЕЖЖЯ УКРАЇНИ

Розглянуто вплив кліматичних факторів на рівень ґрунтових вод. Проведено статистичний аналіз даних. Описано ймовірні механізми руху ґрунтових вод у залежності від фізичних факторів. Запропоновано шляхи подальших досліджень.

*Ключові слова: рівень ґрунтових вод, ґрунтова гідрологія, кліматичні ознаки, випаровування, конденсація, дифузія.*

A.K. Balalayev, A.V. Kotovich

*Dnipropetrovsk National University*

### INFLUENCE OF ABIOTIC FACTORS ON THE MODE OF GROUND WATERS IN CONDITIONS OF A STEPPE ZONE OF LEFT-BANK UKRAINE

The influence of climatic factors on a ground-water level is considered. The statistical analysis of the data is carried. The probable mechanisms of driving of ground waters are circumscribed depending on the physical factors. The paths of further researches are offered.

*Key words: a ground-water level, soil hydrology, climatic factors, evaporation, condensation, diffusion.*

Вопрос происхождения и питания подземных вод к настоящему времени является весьма дискуссионным, так как учесть количественно и предусмотреть все факторы, влияющие на режим ґрунтовых вод, достаточно сложно. Начало дискуссии можно отнести к античному периоду, когда Аристотель в IV в. до н. э. высказал свои соображения в пользу конденсационного происхождения подземных вод. Несколько позже Марк Витрувий Поллион сформулировал инфильтрационную теорию, суть которой сводилась к образованию подземных вод путем инфильтрации атмосферных осадков. Впоследствии римский философ Сенека (I век н. э.), опровергая эту теорию в своем сочинении «де Архитектура», писал: «... мои наблюдения показывают, что дожди никогда не бывают настолько сильными, чтобы просочиться в землю более трех метров». Тем не менее эта теория господствовала вплоть до XIX в. В 1877 г. австрийский инженер Отто Фольгер выдвинул гипотезу, согласно которой вода в почву проникает в ґрунт только в парообразном состоянии вместе с воздухом, где вследствие разности температур конденсируется на небольшой глубине.

Инфильтрационная теория происхождения подземных вод осталась ведущей для многих ученых того времени. Г.Н. Высоцкий объяснял происхождение ґрунтовых вод в степи инфильтрацией атмосферных осадков, аккумулирующихся в «вершинных балочных лощинах» – понижениях, которые он называл потускулами. Впоследствии многими исследователями был сделан акцент на исследование процессов испарения и конденсации воды, происходящих в почве (Лебедев, 1936; Абрамова, 1963; Алимов, Майылов, 1985). О важности этой проблемы говорит тот факт, что с 1887 по 1987 год было опубликовано около 300 работ.

Данная тематика и в настоящее время не утратила своей актуальности. Так, гидрологический режим почво-ґрунтов и режим ґрунтовых вод в степной зоне оказывает решающее влияние при формировании того или иного типа биоценоза. Несомненно, гидрологический режим почво-ґрунтов и ґрунтовых вод зависит не только от процессов, происходящих в почвенной толще, но и от климатических факторов. Поэтому на территории

© Балалаев А.К., Котович А.В., 2003

Присамарского биосферного стационара им. А.Л. Бельгарда (Днепропетровская обл., Новомосковский район) на протяжении многих лет в комплексе других геоботанических исследований ведутся работы по изучению гидрологического и гидроклиматического режима.

#### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом наших исследований являются степные биогеоценозы (разнотравно-типчаково-ковыльняная степь), расположенные на вершине водораздельного плато со слабым склоном на  $1,5^\circ$  северо-восточной экспозиции. Тип лесорастительных условий – суглинки сухой ( $СГ_{0-1}$ ). В травяном ярусе преобладают *Festuca rupicola* Heuff., *Poa nemoralis* L., *Thymus marschalianus* Wild, *Linum hirsutum* L., *Stipa Lessingiana trineta* Rupr. и пр. Почва – чернозем обыкновенный, карбонатный, малогумусный, среднесуглинистый на лессовидных суглинках, вскипание – с глубины 46 см. По гранулометрическому составу почва тяжелосуглинистая. Количество гумуса равняется 4,3 % в верхнем горизонте и постепенно уменьшается с увеличением глубины. В верхних горизонтах реакция  $pH$  нейтральная, с увеличением глубины реакция переходит в щелочную. Соотношение  $Ca^{2+} : Mg^{2+}$  равняется 9 : 7. Анализ водной вытяжки свидетельствует об отсутствии засоления.

На основании данных, полученных в результате буровых работ, проведенных в 70-х гг. прошлого века, Л.П. Травлеевым (1977) составлен геологический разрез исследуемого района (рис. 1). Грунтовые воды в районе проведения исследований появляются с глубины 10 м и приурочены к отложениям харьковского яруса палеогена ( $Pg_3hr$ ).

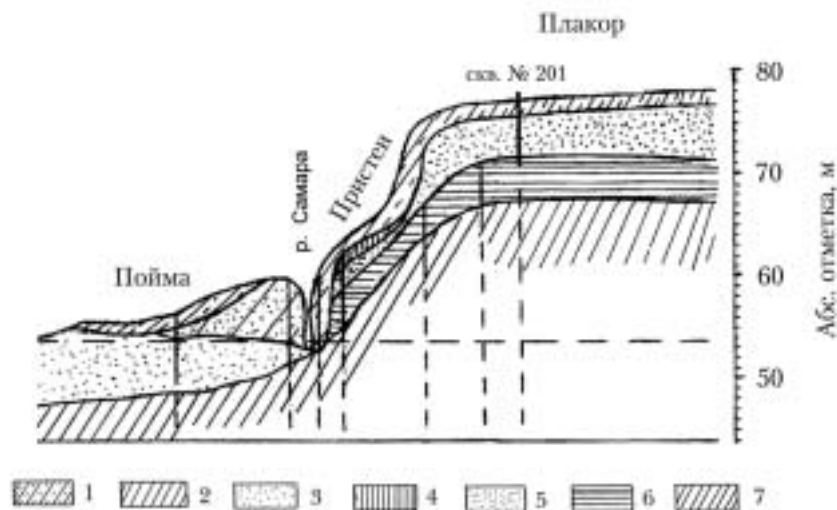


Рис. 1. Профиль района Присамарского стационара от водораздела до поймы: 1 – суглинки (al  $Q_{2-4}$ , eol  $Q_2$ ); 2 – супеси (al, d, eol  $Q_4$ ); 3 – пески неогеновые ( $N_1$ ); 4 – глина красно-бурая ( $N_2 + Q$ ); 5 – пески, аллювиальные отложения (al<sub>2</sub>  $Q_{2-4}$ , sol  $Q_4$ ); 6 – глина серо-бурая, плотная – харьковский ярус палеогена ( $Pg_3 hr$ ); 7 – глина темно-серая, вязкая (водоупор) – харьковский ярус палеогена ( $Pg_3 hr$ )

Климатологические исследования проводились по стандартным методикам на учебно-научной метеостанции, расположенной на территории Присамарского биосферного стационара –  $48^\circ 15'$  с. ш. и  $35^\circ$  в. д. (Грицан, 2000). Помимо описанных климатических показателей определялась месячная величина испаряемости  $E_0$  (мм/мес.) по формуле Н.Н. Иванова

$$E_0 = 0,0018 (T + 25)^2 \times (100 - r),$$

где  $T$  – среднемесячная температура;  $r$  – относительная влажность воздуха (Константинов, 1963). У показателя  $E_0$  есть существенный недостаток, он не измеряется непосредственно в ходе эксперимента с помощью специальных приборов. Замеры уровня грунтовых

вод проводились в гидрологической наблюдательной скважине с помощью рулетки, оборудованной на конце специальным поплавком-хлопушкой, позволяющим проводить замеры с точностью до 0,5 см (Котович, 2002).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты почти четырехлетних измерений среднемесячных климатических показателей и уровня грунтовых вод (УГВ) приведены на сводном годографе (рис. 2). Он имеет сложный стохастический характер изменения всех показателей, при этом отчетливо прослеживается годовая цикличность. В теплые периоды года УГВ минимален, в холодные же он максимален. Между этими двумя крайними точками происходит его колебания. Сходной изменчивостью обладают и климатические признаки. Для выявления зависимостей между рассматриваемыми переменными необходимо применение статистического анализа.

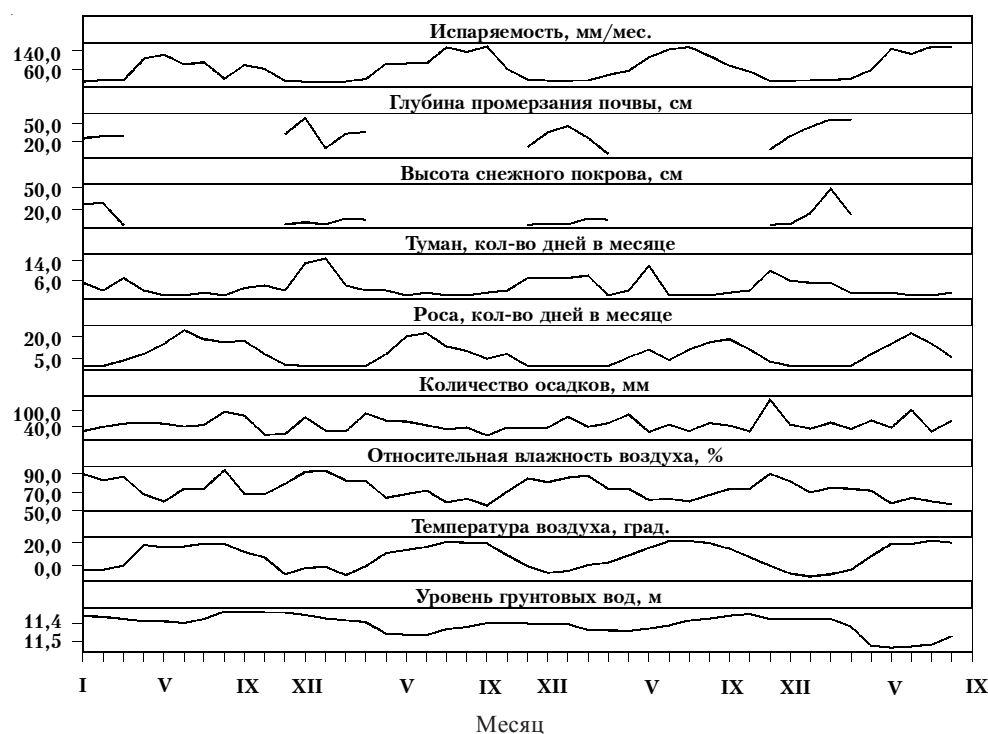


Рис. 2. Сводный годограф (1993–1996 гг.) среднемесячных климатических показателей и уровня грунтовых вод

Предварительные выводы можно сделать оценивая корреляционную связь (Лакин, 1990) УГВ с климатическими признаками в теплое, холодное время года и круглогодично. Высокие значения коэффициентов корреляции с уровнем значимости  $p \leq 0,05$  выделены жирным шрифтом (табл. 1). Как можно было ожидать, на УГВ летом и зимой, рассматриваемые факторы влияют в разной степени. Однако сравнение корреляционных коэффициентов с различным объемом выборки не совсем корректно с математической точки зрения. Поэтому мы рассмотрим соотношения показателей тесноты связи климатических признаков с УГВ в пределах выборки одного объема.

В холодный период года присутствует отрицательная корреляционная связь УГВ с температурой воздуха и испаряемостью (зависящей от температуры во 2-й степени). То есть чем ниже температура воздуха, тем выше УГВ и наоборот. Влияние снижения температуры воздуха на УГВ опосредованное, его можно объяснить процессом замерзания верхнего слоя почвы.

В теплые периоды года преобладают иные закономерности. Относительная влажность воздуха является наиболее положительно связанным климатическим признаком с УГВ, а испаряемость – наиболее отрицательно связанным. Этот факт, с нашей точки зрения, объясняется тем, что в периоды летней засухи общая влажность воздуха понижается, а испаряемость с поверхности почвы возрастает.

Таблица 1

**Коэффициенты взаимной корреляции Пирсона ( $r$ ) и их уровни значимости ( $p$ ) климатических признаков и уровня грунтовых вод**

Уровень грунтовых вод, м	Объем выборки	Статистический показатель	AIR_TEMP	AIR_MOIS	PRECIPIT	DAY_DEW	DAY_MIST	SNOW_DEP	FROSTZON	EVAPORAT
Зима	18	г	<b>-0,45</b>	0,27	-0,07	0,22	0,24	0,15	0,21	<b>-0,66</b>
		р	<b>0,06</b>	0,29	0,80	0,38	0,35	0,55	0,40	<b>0,00</b>
Лето	26	г	-0,17	<b>0,42</b>	-0,14	-0,05	0,12	-	-	<b>-0,38</b>
		р	0,41	<b>0,04</b>	0,48	0,81	0,58	-	-	<b>0,05</b>
В течение года	44	г	-0,38	0,48	-0,10	-0,28	0,29	0,20	0,31	-0,47
		р	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	0,54	<b>0,06</b>	<b>0,06</b>	0,18	<b>0,04</b>	<b>0,00</b>

Примечание. LEW\_SWAT – уровень залегания грунтовых вод; AIR\_MOIS – относительная влажность воздуха; AIR\_TEMP – температура воздуха; DEW\_MIST – число туманных дней; DEY\_DEW – число дней с выпавшей росой; PRECIPIT – количество выпавших осадков; SNOW\_DEP – высота снежного покрова; FROSTZON – глубина промерзания почвы; EVAPORAT – испаряемость.

Если в расчете коэффициента корреляции участвуют данные на весь год, то проявляются более сложные зависимости, включающие в себя летние и зимние закономерности. Среди новых признаков, проявляющих статистически значимую корреляционную связь с УГВ, отметим глубину промерзания, количество дней с туманом и росой. Новые связи не противоречат высказанным выше предположениям, так как явления тумана и росы тесно связаны с температурой и влажностью воздуха. Необходимо обратить внимание, что вычисленная величина месячной испаряемости, несмотря на ее недостатки, проявляет значимую корреляционную связь в разные периоды года. На наш взгляд, коэффициенты корреляции будут выше и закономерности четче, если использовать вместо среднемесячных среднедекадные или среднесуточные данные. Усредняя числа за большие периоды времени, мы теряем часть полезной информации.

Идеи, заложенные в стандартный корреляционный анализ, не дают полного представления о взаимозависимых связях между изучаемыми признаками почвы, так как климатические признаки воздействуют на УГВ не по одному (по очереди), а комплексно (одновременно). К тому же коэффициент корреляции хорошо отражает только линейную связь. Для решения этой задачи необходимо применение многомерных методов. Мы воспользуемся кластерным подходом в его англомеративном представлении, отличающемся своей наглядностью (Мандель, 1988; Боровиков, 1998). В качестве меры сходства признаков примем квадрат евклидова расстояния между ними. Выберем метод Уорда за его склонность к образованию компактных гиперсферических кластеров. Приведенные дендрограммы, в вычислении которых использовались среднемесячные данные за весь год (рис. 3, а), в теплый (рис. 3, б) и холодный (рис. 4) периоды, показывают относительные расстояния (отношение расстояния признака до ближайшего кластера к расстоянию между максимально удаленными кластерами) в гиперпространстве признаков. Обозначения признаков те же, что и в табл. 1. Поскольку испаряемость является зависимой от

температуры и влажности воздуха, она в анализе не участвует из-за вносимых ею искажений результата.

Если принимать во внимание данные за весь год, то УГВ ближе всего расположен к кластеру *влажность воздуха – количество туманных дней* и, как ни удивительно, далее всего – от количества выпавших осадков. Этот факт никак нельзя отнести к полезности инфильтрационной теории. Остальные компактные кластеры, приведенные на дендрограмме, поддаются логическому объяснению. Кластер *глубина промерзания – высота снежного покрова* связан с зимними морозами, а кластер *температура воздуха – число дней с росой* можно объяснить летними перепадами температур. Не столь компактные кластеры, образованные данными за летнее и зимнее время, можно истолковать меньшим объемом выборки.

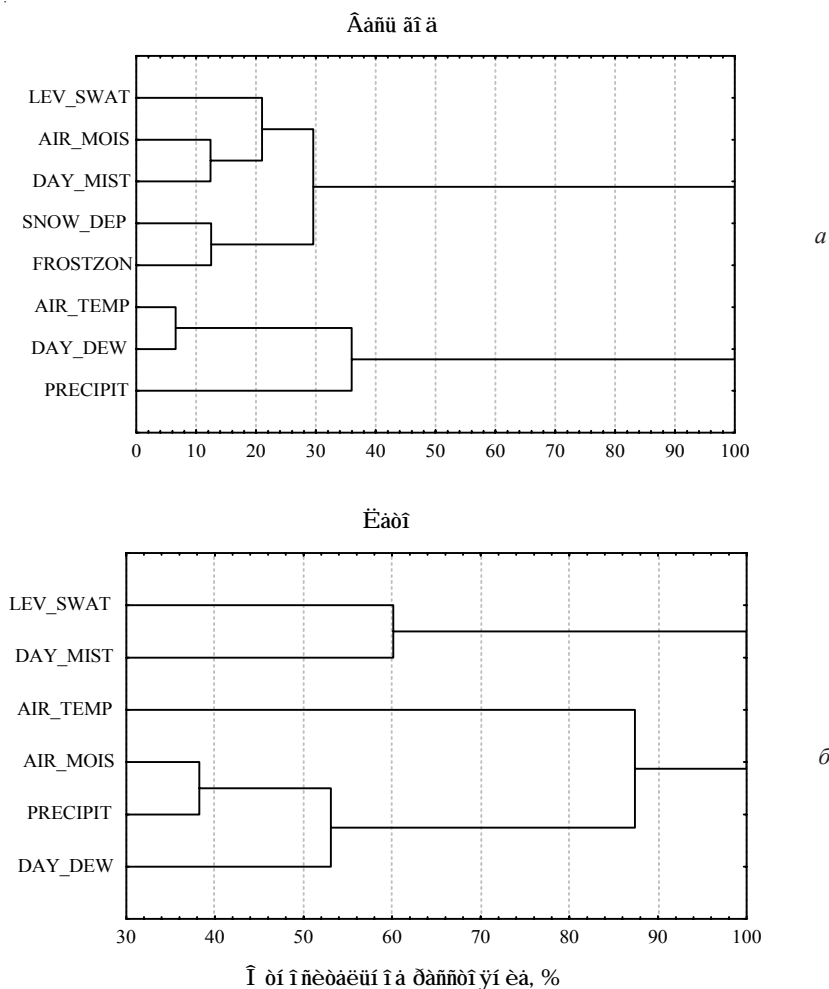


Рис. 3. Дендрограммы объединения в кластеры среднемесячных климатических показателей и уровня грунтовых вод за весь год (а) и лето (б)

Дендрограммы объединения в кластеры климатических признаков в холодные и теплые периоды года имеют свои особенности. В первом случае УГВ тяготеет к кластеру, связанному с зимними морозами. Здесь механизм перемещения подземной влаги прост, зимой вода в верхней части почвы переходит в твердое фазовое состояние (лед) и активные процессы перемещения влаги происходят в более глубоких слоях, практически не выходя на поверхность. Остальные кластеры в общих чертах сохраняют свою структуру.

На втором случае стоит остановиться подробнее. Структура соответствующей дендрограммы существенно перестраивается, и УГВ образует теперь единый кластер с числом туманных дней. Влажность воздуха обоснованно связана с количеством осадков, а температура воздуха расположена обособленно. Туман – это большое скопление продуктов конденсации водяного пара в нижнем слое воздуха, непосредственно прилегающем к земной поверхности. Это явление часто наблюдается в безветренную погоду и при понижении температуры. По определению, туман является хорошим индикатором нахождения приземного слоя воздуха в стадии, близкой к насыщению водяными парами. В поровом пространстве почвы воздух находится в подобном состоянии. Следовательно, интенсивность испарения за счет диффузии, направленной по градиенту влажности, замедляется, что способствует сохранению грунтовой воды.

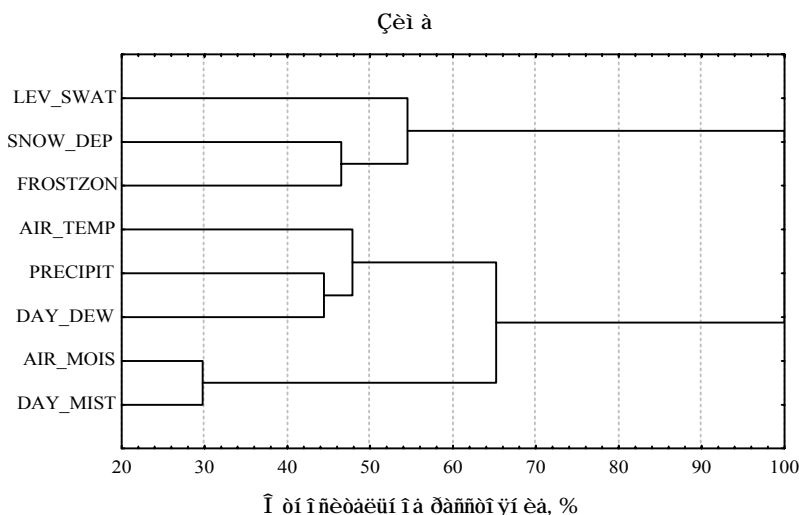


Рис. 4. Дендрограмма объединения в кластеры среднемесячных климатических показателей и уровня грунтовых вод в холодный период года

Известно, что перемещение грунтовых вод обладает инерционностью или задержкой по отношению к внешним физическим воздействиям, связанным с поступлением или оттоком влаги, то есть последствия интенсивных осадков либо сильной засухи влияют на УГВ с существенным запаздыванием. Для оценки величины задержки применим вероятностный метод анализа системы (Rapoülis, 1984; Купер, Макгиллем, 1989; Вентцель, 1999) и вычислим взаимно корреляционную функцию (ВКФ). Она представлена в виде графика (рис. 5) взаимодействия каждого из шести климатических признаков с УГВ. Из рассмотрения исключены непостоянно действующие климатические показатели, связанные с морозами, – глубина промерзания почвы и высота снежного покрова. Масштабирование производится таким образом, чтобы значение ВКФ при нулевом смещении было равно 100 %. Максимальная величина смещения в сторону прошлого (–) и будущего (+) нами принята за 12 месяцев. При увеличении задержки до 24 или 36 месяцев наблюдается явная годовая цикличность. Рассмотрим подробнее ход кривых ВКФ.

Из графиков видно, что все климатические признаки обладают сильной зависимостью от сдвига во времени относительно УГВ. Дело в том, что при отсутствии временной связи ВКФ имела бы вид равнобедренного треугольника с вершиной в нулевом смещении. То есть при увеличении смещения во времени теснота связи (оценка ВКФ) линейно снижается. Особенно выделяются минимумы и максимумы ВКФ при смещении в прошлое на 4–5 месяцев. Иными словами, изменение УГВ сегодня сильнее зависит от влияния климатических факторов 4–5 месяцев назад, чем в данный момент. Такие процессы можно назвать процессами с последствием или памятью, где вероятность текущего события зависит от вероятности предыдущих событий. Они в математике хорошо изучены и моделируются сложными цепями Маркова. Выявленный факт сильной нелинейности

ВКФ еще больше осложняет изучение влияния климатических факторов на режим грунтовых вод.

Много внимания уделяется изучению вопросов передвижения почвенной влаги и смены ее фазового состояния в физике почв как разделе общей физики. Любые физические свойства почвы (механические, термодинамические, электромагнитные и др.) в той или иной степени связаны с содержанием воды. Многие задачи давно и успешно решаются, написан не один том обстоятельных монографий (Качинский, 1965, 1970; Нерпин, Чудновский, 1967; Бондаренко, 1973; Судницын, 1979; Матвеев, 1987). Теоретические основы физики затронутых в статье проблем подробно описаны в тех же источниках. Здесь отметим качественно лишь некоторые принципиальные, на наш взгляд, моменты.

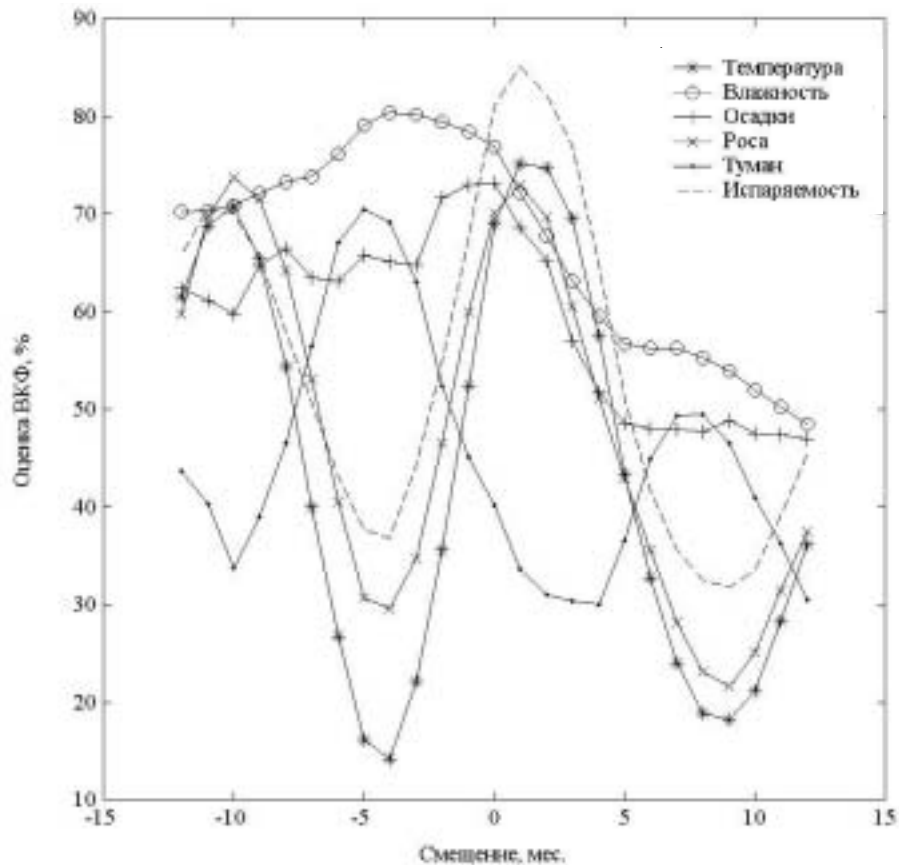


Рис. 5. Графики взаимной корреляционной функции (ВКФ) шести среднемесячных климатических признаков (смещение 0–12 месяцев) от изменения уровня грунтовых вод

Движение воды в капиллярно-пористых средах, к каковым относится и почва, может происходить под действием самых разнообразных движущих сил, представляющих градиент давления, потенциала гравитационного поля, потенциала электрического поля, температуры, концентрации растворенных веществ. При этом необходимо различать силы, распределенные по объему, и поверхностные силы, возникающие на границе «жидкость – воздух» и «жидкость – твердое тело».

При всей полезности теоретических разработок у них имеется один существенный недостаток. Для упрощения решения задач, как правило, каждый физический процесс, происходящий в почве, изучается в отдельности, предполагая большое число ограничений. Для подтверждения теорий ставятся соответствующие эксперименты, результаты которых иногда противоречат друг другу и тому, что происходит в природе. Процессы, происходящие в реальных природных условиях, настолько многообразны и динамичны,

что их трудно объяснить только одним физическим явлением. Например, одни авторы утверждают, что парообразная влага движется по направлению градиента температуры к более холодным частям почвы, то есть летом вниз, а зимой и в заморозки – вверх. Другие исследователи устанавливают факты интенсивного перемещения вверх насыщенного паром воздуха в теплый период года. На первый взгляд имеется явное противоречие, но правы и те и другие, так как в той или иной степени в почве присутствуют оба явления.

Проблема в том, что в первом случае предполагается, что почвенный воздух находится в состоянии, близком к насыщенному пару, и что поровое пространство почвы является замкнутой системой. Но такая ситуация возникает далеко не всегда. В нашей климатической зоне с жарким летом приземный слой воздуха далек от насыщения, а поровое пространство не является замкнутым. В этих условиях термодинамическая система, стремясь сохранить равновесие, диффундирует парообразную влагу из нижних, более насыщенных молекулами воды слоев почвы на поверхность. Описанный процесс усиливают сильные ветры (особенно суховеи) и явление транспирации. К тому же то, что температурный градиент всегда направлен вертикально, – спорный вопрос. Если учесть локальное выделение тепла при конденсации, поглощение при испарении, выделение и поглощение тепла при многих химических реакциях и в результате жизнедеятельности микроорганизмов, то можно предположить, что температурное поле в почве становится неоднородным и динамичным.

Зимой картина меняется на противоположную, верхний слой почвы замерзает и создает естественный барьер для испарения влаги, то есть система приближается к замкнутой и почвенный воздух насыщается парами воды. В этих условиях температурный градиент становится главенствующим. Осенью и весной в почве одновременно присутствуют оба явления. Не менее важны и интересны явления адсорбции и десорбции, движения капиллярной и пленочной влаги, изменчивости концентрации солей, градиента электрического поля и др. По нашему убеждению, для правильной интерпретации процессов перемещения влаги в почве необходим комплексный подход с учетом максимально возможного числа факторов, в том числе и биогенного происхождения. Тем более что для осуществления этой задачи к настоящему времени уже создано большинство теоретических предпосылок, а вычислительные барьеры для современных компьютеров не так актуальны. Главная трудность заключается в корректном сведении воедино накопленных почвоведомы знаний. Однако далеко не все перечисленные выше физические явления вносят большой вклад в изменение УГВ. Далее рассмотрим вероятные процессы, влияющие именно на режим грунтовых вод подробнее.

Вода, находящаяся в почве, расходуется на испарение (Константинов, 1963; Травлев Л.П., Травлеев А.П., 1979; Братсерт, 1985) двумя путями: физическое испарение самой почвой и физиологическое (транспирация) в процессе жизнедеятельности растений (Блэк, 1973; Нерпин, Чудновский, 1975). Воду потребляют и испаряют также и другие представители почвенного биоценоза. Физически молекулы воды могут диффундировать с глубины до нескольких метров (только в случае высыхания верхних слоев), что иногда соответствует капиллярному уровню поднятия грунтовых вод. Но чаще происходит медленная миграция парообразной влаги из нижележащих почвенных слоев вверх. Рост температуры воздуха ускоряет этот процесс, а выпадение осадков, наоборот, замедляет.

Механизм транспирации сложнее и зависит от вида растительности. Травянистая растительность, которая преобладает в степи, потребляет влагу с поверхностных (до 0,5 м) почвенных слоев и напрямую не влияет на УГВ, хотя опосредованное влияние возможно посредством физиологического воздействия на процесс высыхания верхних почвенных слоев, куда и устремляется парообразная влага из нижних горизонтов. Достигнув поверхностных слоев, водяной пар, близкий к насыщению, может конденсироваться на некоторых почвенных структурах, тогда вода станет доступной для травы. Подобный механизм питания используют целые группы растений с длинной корневой системой в пустынной зоне. Корневая система некоторых видов древесных растений в состоянии дотянуться до капиллярной каймы грунтовых вод и работать как физиологический насос. Даже если в непосредственной близости от контрольной скважины деревья не растут, неподалеку расположенный лес, сад или лесополосы могут непосредственно в процессе своей жизнедеятельности влиять на УГВ. Учитывая, что площадь распространения водоносного



горизонта велика и пласт грунтовых вод представляет из себя единую связанную систему, вода может перетекать из зоны скважины в зону разряжения под древостоем, выравнивая УГВ. Процессы транспирации многократно возрастают при увеличении температуры воздуха и солнечной радиации. Вопрос о соотношении вкладов в процесс испарения физического и физиологического механизмов и сейчас остается открытым.

Еще один важный фактор, который может влиять на падение УГВ в теплый период года, – существенное снижение уровня воды в р. Самара в результате естественного испарения и использование воды для хозяйственных нужд. В этом случае вероятно пополнение воды в реке грунтовыми водами за счет дренажа и соответственно снижение УГВ, ведь известно, что в наших широтах одним из источников питания рек являются грунтовые воды. Один из недостатков нашей работы – именно отсутствие данных об уровне воды в Самаре за рассматриваемый период.

Из рассмотренного описания процессов миграции почвенной влаги видно, что в летний период времени имеется гораздо больше факторов, способствующих падению УГВ, чем его росту. Далеко не вся грунтовая вода в том или ином фазовом состоянии попадает на поверхность. Значительная ее часть остается в почвенной толще в результате капиллярного поднятия, конденсации, адсорбции и др. Все это можно отнести к факторам, влияющим на режим грунтовых вод. Итак, можно считать статистически достоверной взаимосвязь между уровнем грунтовых вод на глубине несколько метров и климатическими факторами, способствующими испарению воды с поверхности почвы. При этом роль количества выпавших осадков второстепенна. Откуда же берется вода для восстановления УГВ в холодные периоды года? Может быть, вода, мигрировавшая летом в верхние почвенные слои, возвращается вниз? Тогда почва, лежащая выше грунтовых вод, является гигантским аккумулятором воды. Возможно, грунтовые воды пополняются за счет постоянного притока из нижележащих водоносных слоев через трещины и расщелины в водонепроницаемом горизонте? Тогда летом просто испаряется влаги гораздо больше, чем поступает из источника, а зимой баланс восстанавливается. Пока вопросов возникает больше, чем ответов на них. Однозначно ответить на поставленные вопросы и подтвердить или опровергнуть высказанные предположения, оперируя приведенными цифрами, невозможно. Проблематично также определить процентное соотношение между источниками пополнения грунтовых вод и источниками расхода. Для этого необходимо проведение дополнительных целенаправленных экспериментов.

Учитывая сложность и дороговизну экспериментальных исследований динамики передвижения влаги в почве на всей глубине от поверхности до водоупора в природных условиях, необходимо создание адекватной математической модели. Подобные математические модели, выражающие закономерности протекания физико-химических процессов, оказываются ценными как в теоретическом, так и в практическом отношении. К настоящему времени почвенная наука накопила достаточно много информации по данному направлению (Нерпин, Чудновский, 1967; Бондаренко, 1973; Ромм, 1985; Пачепский, 1990). При большом разнообразии материалов, методов и подходов к моделированию далеко не каждая модель может быть использована для решения поставленных перед нами задач. Создать универсальную модель на все случаи жизни, как нам представляется, достаточно проблематично, если вообще возможно. Одни модели ориентированы на конкретный тип почвы, другие применимы только в определенных климатических условиях, а третьи используются только при однородной почвенной структуре. Вероятно, что для полного описания особенностей физико-химических процессов, характерных для черноземных почв, понадобится создание собственной математической модели либо существенная модификация уже существующих моделей.

Интуитивно ясно, что перемещение водных растворов в почве зависит от внешних условий (климат) и свойств (физические, химические, биологические и структурные показатели) пористой среды, в которой происходят интересующие нас динамические процессы. На сегодняшний день не вызывает сомнения структурно-функциональная концепция, принятая в гидрофизике почв (Воронин, 1984). В частности, выяснено существование зависимости параметров гидрофизических моделей от гранулометрического состава, плотности сложения почвы и кривой распределения пор по размерам. Развивая

эту концепцию, можно прийти к необходимости более детального изучения эффектов влияния почвенного сложения и особенно геометрии порового пространства на изменение жидкой почвенной фазы к внешним воздействиям.

Чем выше изучаемый уровень организации почвы, тем больше необходимо эмпирических параметров, описывающих модель и зависящих от конкретного типа почвы. При этом для построения адекватной математической модели требуется экспериментальный материал. Наряду с традиционными характеристиками (механический, химический и минералогический составы, плотность, пористость, удельная поверхность, влагоемкость, коэффициент фильтрации и т. д.) необходимы величины, описывающие геометрию порового пространства. В этом смысле нам представляются ценными микроморфологические исследования почвенных образцов, особенно с применением ЭВМ (Парфенова, Ярилова, 1977; Белова, 1997; Effects of Soil ..., 1999; Балалаев, 2002; Reuter, Bell 2003).

Основной задачей построенной модели будет прогнозирование вертикальной миграции влаги в толще грунта и изменения УГВ при воздействии внешних климатических факторов, а также обоснование протекающих физико-химических процессов. Для этого необходимо осуществить длительный мониторинговый эксперимент на базе биосферного мониторингового стационара ДНУ, по крайней мере в течение одного года. Потребуется ежесуточное (возможно, и несколько раз в сутки) измерение не только температуры и влажности воздуха, количества выпавших осадков, но также испарения с поверхности почвы по известным методикам (Константинов, 1963), уровня воды в р. Самара и интенсивности транспирации. Однако главная трудность, которую предстоит решить, – одновременное измерение температуры и влажности почвы. Замеры необходимо проводить на различной глубине с шагом не более 0,5 м вплоть до водоносного горизонта с помощью соответствующих электронных датчиков. При этом пока нет однозначного ответа на вопрос, как отличать на глубине влагу в жидкой фазе (капиллярную) от парообразной? Ведь по мере того как количество жидкой воды уменьшается, количество водяных паров сначала увеличивается, а затем уменьшается. В почвах местами толщина пленки воды составляет всего несколько молекулярных слоев, подвижность жидкой фазы сильно ограничена, и встает вопрос о значении перемещения воды в парообразном состоянии по отношению к ее движению в жидкой фазе. Этот вопрос нуждается в решении, так как физические законы распространения воды принципиально зависят от ее фазового состояния. В то же время жидкую и парообразную фазы нельзя изучать независимо, они существуют параллельно и их перемещение взаимосвязано. Постановку и проведение подобного эксперимента мы планируем произвести в ближайшее время.

## ВЫВОДЫ

Установлено влияние основных климатических факторов на динамику уровня грунтовых вод, а также сильная зависимость этого влияния от смещения во времени.

Наряду с процессами инфильтрации значительное влияние на режим грунтовых вод в условиях степной зоны левобережной Украины оказывает парообразная влага.

По всему почвенному профилю круглогодично происходит перемещение почвенной влаги, причем на различных глубинах механизмы перемещения различны и существенно зависят от времени года. При относительной изученности процессов перемещения почвенной влаги в теплые периоды года механизмы пополнения грунтовой воды в холодные периоды года остаются до конца не выясненными и нуждаются в дополнительных исследованиях. Без грамотно поставленного длительного эксперимента для подтверждения высказанных предположений вряд ли возможно правильное решение задачи о скорости, направлении и фазовом состоянии перемещения грунтовых вод в зависимости от типа почвы и внешних абиотических факторов.

Проведенный анализ взаимозависимости УГВ и ряда климатических факторов отразил исключительную сложность и неоднозначность процессов перемещения грунтовой влаги по всему почвенному профилю – от почвенной поверхности до водоупора. Изложенная работа продвигает нас в понимании проблем почвенной гидрологии и намечает пути для дальнейших исследований.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Абрамова М.М. О передвижении парообразной влаги // Почвоведение. – 1963. – № 10. – С. 49-63.
- Алимов А.К., Майылов Г.Ю. Испарение грунтовых вод при различных экологических и почвенно-мелиоративных условиях // Почвоведение. – 1985. – № 8. – С. 73-81.
- Балалаев А.К. Опыт применения компьютерных технологий в морфометрических исследованиях почвенных микрошлифов // Грунтознавство. – 2002. – Т. 2, № 1-2. – С. 88-69.
- Белова Н.А. Экология, микроморфология, антропогенез лесных почв степной зоны Украины. – Д.: Изд-во ДГУ, 1997. – 264 с.
- Блэк К.А. Растение и почва. – М.: Колос, 1973. – 502 с.
- Бондаренко Н.Ф. Физика движения подземных вод. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1973. – 215 с.
- Боровиков В.П. Популярное введение в программу STATISTICA. – М.: КомпьютерПресс, 1998. – 267 с.
- Братсерт У.Х. Испарение в атмосферу. Теория, история, приложения. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1985. – 350 с.
- Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Высш. шк., 1999. – 579 с.
- Воронин А.Д. Структурно-функциональная гидрофизика почв. – М.: Изд-во МГУ, 1984. – 204 с.
- Грицан Ю.І. Екологічні основи перетворюючого впливу лісової рослинності на степове середовище: Монографія. – Д.: Вид-во Дніпропетр. ун-ту, 2000. – 300 с.
- Качинский Н.А. Физика почв. Ч. 1. – М.: Высш. шк., 1965. – 323 с.
- Качинский Н.А. Физика почв. Ч. 2. – М.: Высш. шк., 1970. – 358 с.
- Константинов А.Р. Испарение в природе. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1963. – 590 с.
- Котович А.В. Мониторинговые исследования уровней и химизма грунтовых вод в границах Присамарского биосферного стационара // Грунтознавство. – 2002. – Т. 2, № 1-2. – С. 114-117.
- Купер Дж., Макгиллем К. Вероятностные методы анализа сигналов и систем. – М.: Мир, 1989. – 376 с.
- Лакин Г.Ф. Биометрия. – М.: Высш. шк., 1990. – 352 с.
- Лебедев А.Ф. Почвенные и грунтовые воды. – М.: Ленинград, 1936. – 365 с.
- Мандель И.Д. Кластерный анализ. – М.: Финансы и статистика, 1988. – 176 с.
- Матвеев А.Н. Молекулярная физика. – М.: Высш. шк., 1987. – 360 с.
- Нерпин С.В., Чудновский А.Ф. Физика почвы. – М.: Наука, 1967. – 584 с.
- Нерпин С.В., Чудновский А.Ф. Энерго- и массообмен в системе растение–почва–воздух. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1975. – 358 с.
- Парфенова Е.И., Ярилова Е.А. Руководство к микроморфологическим исследованиям в почвоведении. – М.: Наука, 1977. – 197 с.
- Пачепский Я.А. Математические модели физико-химических процессов в почвах. – М.: Наука, 1990. – 187 с.
- Ромм Е.С. Структурные модели порового пространства горных пород. – Ленинград: Недра, 1985. – 240 с.
- Судницын И.И. Закономерности передвижения почвенной влаги. – М.: Изд-во МГУ, 1979. – 254 с.
- Травлеев Л.П. Условия формирования, глубина залегания и химизм грунтовых вод Присамарья // Вопросы степного лесоведения и охраны природы. – Д.: ДГУ, 1977. – С. 54-63.
- Травлеев Л.П., Травлеев А.П. Спутник геоботаника по почвоведению и гидрологии. – Д.: Изд-во ДГУ, 1979. – 82 с.
- Effects of Soil Morphology on Hydraulic Properties: II. Hydraulic Pedotransfer Functions / H.S. Lin, K.J. McInnes, L.P. Wilding, C.T. Hallmark // Soil Sci. Soc. Am. J. – 1999. – Vol. 63, Iss. 4. – P. 955-961.
- Papoulis A. Probability, Random Variables, and Stochastic Processes. – N.-Y.: McGraw-Hill, Inc., 1984. – P. 420.
- Reuter Ron J. and Bell Jay C. Hillslope Hydrology and Soil Morphology for a Wetland Basin in South-Central Minnesota // Soil Sci. Soc. Am. J. – 2003 – Vol. 67, Iss. 1. – P. 365-372.

*Надійшла до редколегії 09.10.03*