

ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 556.14:556.332.2:556.136:556.164

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО ПИТАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД¹

© 2011 г. С. О. Гринеvский, М. В. Новоселова

Московский государственный университет

119991 Москва ГСП-1, Ленинские горы

Поступила в редакцию 10.04.2009 г.

Рассмотрено влияние метеорологических, ландшафтных, геолого-почвенных и гидрогеологических факторов на формирование общего водного баланса и инфильтрационного питания подземных вод. По результатам анализа расчетных среднесуточных и внутригодовых значений элементов водного баланса на поверхности земли и в зоне аэрации выявлены определенные закономерности, определяющие итоговое поступление влаги на уровень грунтовых вод при различной глубине его залегания (инфильтрацию).

Ключевые слова: инфильтрационное питание подземных вод, эвапотранспирация, моделирование, зона аэрации, речной сток, водный баланс.

Формирование инфильтрационного питания подземных вод, под которым в настоящем изложении понимается естественное поступление атмосферной влаги на уровень грунтовых вод (УГВ), — сложный, многофакторный природный процесс преобразования атмосферных осадков. Его изучение напрямую связано с формированием естественных ресурсов подземных вод зоны активного водообмена, для которых инфильтрационное питание — главный фактор, обеспечивающий их возобновляемость.

Формирование инфильтрационного питания подземных вод с позиций анализа процессов переноса влаги в зоне неполного водонасыщения — от поверхности земли до УГВ — рассмотрено в работах С.Ф. Аверьянова, Л.М. Рекса, А.А. Роде, И.С. Пашковского, В.М. Шестакова, М.Т. Ван Генухтена и др. На современном этапе исследований все большее внимание уделяется более полному анализу водно-балансовых процессов единого геогидрологического цикла [16] — от выпадения атмосферных осадков до их поступления на поверхность почвы и формирования водного режима зоны аэрации, которые наиболее полно рассмотрены в работах Л.С. Кучмента и А.Н. Гельфана [6], И.С. Пашковского [8, 15], В.М. Шестакова и С.П. Позднякова [16], П. Шредера [17]. Такой воднобалансовый подход к изучению инфильтрационного питания подземных вод позволяет анализировать всю совокупность природных факторов его формирования, обуславливающих, в конечном итоге, существенно различные величины питания.

В настоящей работе рассмотрены результаты моделирования процессов формирования инфильтрационного питания подземных вод, что позволяет выявить закономерности трансформации выпадающих атмосферных осадков в зависимости от метеорологических, ландшафтных, геолого-почвенных и гидролого-гидрогеологических условий на поверхности земли и в зоне аэрации, присущих территориям с гумидным климатом — на примере юго-западной части Московского артезианского бассейна (МAB).

ПОСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ воднобалансовых процессов формирования инфильтрационного питания подземных вод проведен на основе их численного моделирования. Принципиальная структура расчетных моделей, основанных на работах [8, 16–18], состоит из двух блоков, содержание которых подробно изложено в [4].

В первом расчетном блоке моделируются процессы выпадения осадков, образования и таяния снежного покрова, задержания осадков растительностью и их испарения с ее поверхности и с поверхности снега, образования склонового стока, впитывания влаги в почву с учетом ее сезонного промерзания [4].

Второй расчетный блок численно реализован в программе HYDRUS 1D [18] и представляет модель нестационарного влагопереноса в зоне аэрации с учетом процессов испарения из почвы, поглощения влаги корнями растений и ее поступления на УГВ — инфильтрационного питания.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 08-05-00720-а).

Таблица 1. Среднемноголетние значения годовой суммы осадков и средней температуры воздуха по метеостанциям Калужской обл.

Метеостанция	Осадки, мм	Температура воздуха, град
Малоярославец	662	4.9
Мосальск	640	5.0
Спас-Деменск	652	4.6
Жиздра	609	5.0

Анализ закономерностей формирования инфильтрационного питания подземных вод проведен на основе моделирования различных типичных условий на поверхности земли и в зоне аэрации, под которыми понимается определенное сочетание природных факторов, в совокупности определяющих формирование водного баланса. К факторам, обуславливающим наиболее “контрастные” естественные условия формирования инфильтрационного питания подземных вод, относятся

метеорологические условия, определяющие общее поступление влаги из атмосферы и радиационно-тепловой баланс поверхности, и их региональные изменения в пределах одной климатической зоны;

ландшафтные условия, представленные на макроуровне двумя основными естественно-природными типами – закрытым лесным (“лес”) и открытым безлесным (“поле”), определяющими характер трансформации осадков на поверхности за счет их задержания и испарения, формирования и таяния снежного покрова, образования поверхностного стока, а также процессы отвода почвенной влаги за счет транспирации;

почвенный покров – главным образом, его механический (литологический) состав, влияющий на процессы впитывания влаги, ее испарения и стекания по поверхности;

гидрогеологические условия, среди которых определяющее влияние на формирование инфильтрации оказывают состав, строение и свойства подстилающих почву материнских пород зоны аэрации и глубина залегания УГВ.

Анализ многочисленных данных наблюдений на воднобалансовых стационарах, приведенных в работах [1, 7, 11, 14], показывает очевидное влияние микро- и мезонеоднородности ландшафта (типа растительности, ее возраста, степени и характера освоенности сельскохозяйственных угодий и так далее) на формирование отдельных элементов водного баланса. Однако, следует подчеркнуть, что основные различия воднобалансовых условий, определяющие неоднородность формирования инфильтрационного питания подземных вод, проявляются именно на макроуровне. Это определяет соответ-

ствующую детальность рассмотрения роли отдельных факторов в настоящем исследовании.

Их значимость в процессах формирования водного баланса в целом и инфильтрационного питания в частности оценивается по среднемноголетней внутригодовой изменчивости воднобалансовых характеристик и их годовых сумм, полученных по результатам моделирования при незначительных различиях метеорологических условий, проявляющихся в пределах единой климатической зоны. Моделирование проводится с суточным временным шагом с использованием фактических многолетних рядов метеорологических показателей и осредненных параметров для типовых условий на поверхности земли и в зоне аэрации, принятых по опубликованным данным и рассмотренных при описании расчетных моделей [4].

В расчетах использованы ряды суточных метеорологических характеристик (суммы осадков, средней температуры воздуха и солнечной радиации) за период наблюдений с 1960 по 2006 г. по четырём метеостанциям Калужской обл. (табл. 1). Проведенный факторный и пошаговый регрессионный анализ исходных рядов по разным метеостанциям показал отсутствие их кардинальных различий – факторная нагрузка по первому фактору составляет >0.7 и коэффициенты парной корреляции $0.73–0.82$. Это характеризует однотипность климатических условий территории, однако, дальнейший анализ позволил выявить и некоторые различия метеорологических характеристик. Так, показатели по метеостанциям Спас-Деменск и Мосальск (центр области) наиболее схожи, а характеристики станций Малоярославец и Жиздра (север и юг области) имеют индивидуальные различия и отражают климатическую зональность территории.

При проведении настоящих исследований принято, что метеорологические характеристики, используемые при моделировании, идентичны для рассматриваемых условий полевого и лесного ландшафтов. Наблюдающиеся различия годовых сумм осадков (например, в лесу на $5–7\%$ больше, чем в поле [14]) объясняются погрешностью осадкомеров [12, 13], что дает основание считать их сумму одинаковой для разных ландшафтов [1]. Различия средней температуры воздуха в условиях лесного и полевого ландшафтов, особенно при смене сезонов года, проявляются однозначно [1]. Это, несомненно, сказывается на величинах суточного испарения летом и, особенно, на интенсивности снеготаяния зимой и учитывается при моделировании посредством введения различных коэффициентов затененности ландшафта и стаивания снега [4].

Оценка адекватности результатов моделирования водного баланса на поверхности земли и в зоне аэрации природным закономерностям осуществляется путем их сопоставления с фактическими данными, полученными, главным образом, по матери-

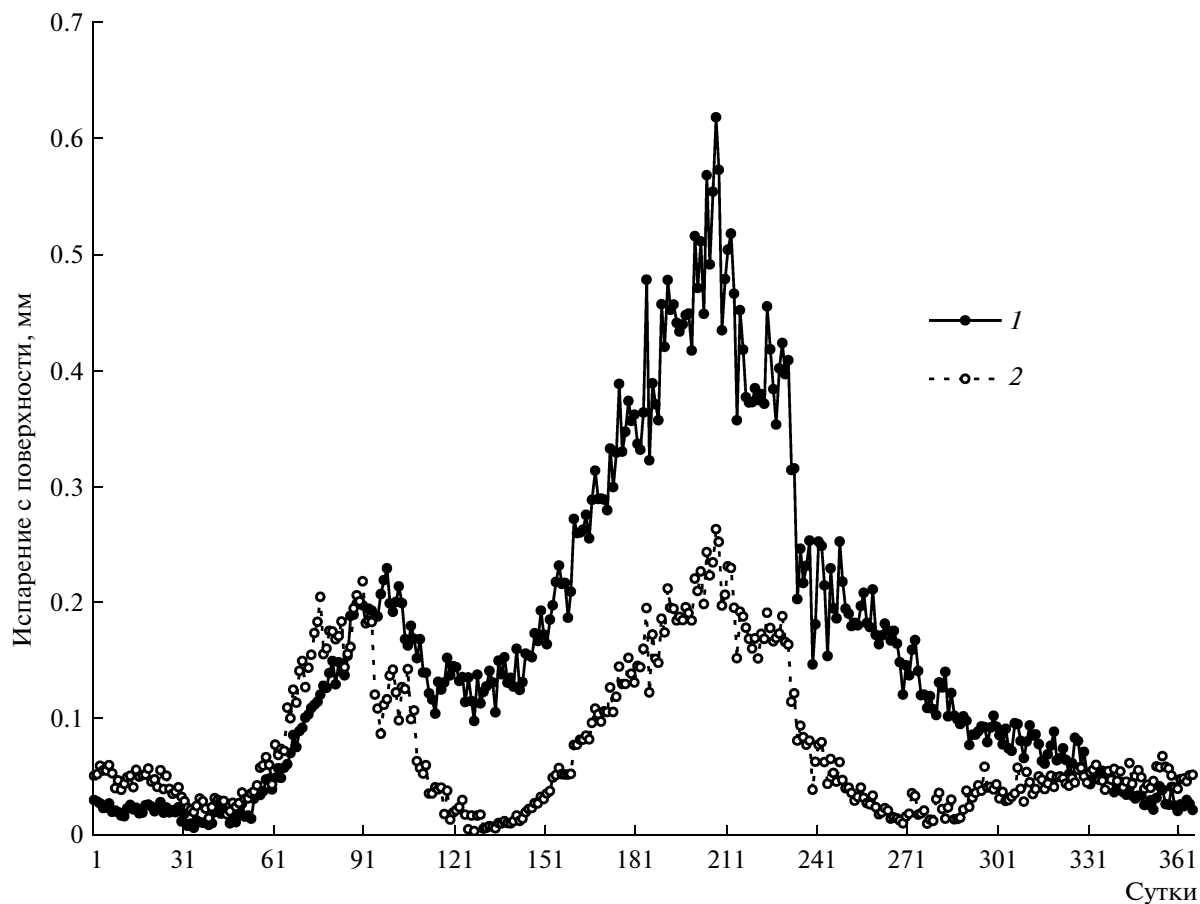


Рис. 1. Внутригодовая изменчивость суммарного испарения с поверхности для полевого и лесного ландшафтов. 1 — лес, 2 — поле.

алам наблюдений на воднобалансовых стационарах [1, 7, 11, 14].

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты проведенного моделирования типовых условий на поверхности земли и в зоне аэрации выявляют характерные особенности формирования среднесезонного водного баланса, которые в совокупности определяют инфильтрационное питание подземных вод в различных природных условиях.

Испарение с поверхности земли и растительности

Основной фактор, определяющий различия суммарного испарения с поверхности, — ландшафтные условия, т.е. характер растительности и динамика ее развития в течение года, что отчетливо проявляется при анализе внутригодовой изменчивости испарения (рис. 1). На графиках, в целом отражающих существенно большее суммарное поверхностное испарение в лесу (за счет задержания осадков

кронами деревьев), прослеживаются два максимума: основной приурочен к весенне-летнему периоду интенсивной вегетации растений, а второй, в начале весны, связан с процессами испарения со снежного покрова за счет весеннего роста температуры. При этом на весеннее испарение ландшафт оказывает слабое влияние (рис. 1). Это связано с тем, что в лесу испарение со снега в весенний период происходит, главным образом, с кроны деревьев [13, 14].

Расчетная доля годового поверхностного испарения для лесного ландшафта (табл. 2) соответствует значениям, характерным для лиственного леса при полноте насаждений 0.5–0.6 [1, 9]. При этом основная часть задержанных осадков (~75%) приходится на летние месяцы, что подтверждается фактическими наблюдениями [14]. В полевых условиях годовая сумма поверхностного испарения примерно вдвое меньше.

Поверхностный сток

Как показывают результаты моделирования, на формирование поверхностного (склонового) стока

Таблица 2. Среднемноголетние характеристики водного баланса на поверхности (в числителе – мм слоя, в знаменателе – % осадков)

Тип почвы	Испарение с поверхности		Поверхностный сток		Влага, доступная для впитывания	
	лес	поле	лес	поле	лес	поле
Песчаная	$\frac{59}{9.2}$	$\frac{29}{4.5}$	$\frac{13}{2.0}$	$\frac{84}{13.0}$	$\frac{572}{88.8}$	$\frac{531}{82.5}$
Супесчаная	$\frac{59}{9.2}$	$\frac{29}{4.5}$	$\frac{46}{7.1}$	$\frac{140}{21.8}$	$\frac{538}{83.7}$	$\frac{474}{73.7}$
Суглинистая	$\frac{59}{9.2}$	$\frac{29}{4.5}$	$\frac{96}{14.9}$	$\frac{169}{26.2}$	$\frac{488}{75.9}$	$\frac{446}{69.3}$

влияют не только различия ландшафтных и почвенных условий (табл. 2), но и изменчивость метеорологических характеристик. Наряду с закономерным увеличением годового слоя поверхностного стока, отражающим рост годовой суммы осадков с юга на север территории, также возрастает и его доля от осадков (с 13 до 16%). В целом, условия образования поверхностного стока более благоприятны в полевых ландшафтах при глинистом составе почвы, а минимальные величины характерны для леса на песчаных почвах (табл. 2). Это происходит за счет “действующей пористости” верхних горизонтов подзолистых почв различного механического состава, которая в лесу значительно выше, чем в поле (в частности, для тяжелосуглинистых – в 3 раза) [10]. Поэтому даже на суглинистых почвах расчетные величины поверхностного стока в лесу почти в 2 раза меньше, чем в поле.

Основной объем поверхностного стока формируется в период весеннего половодья, когда наиболее отчетливо проявляется влияние природных ландшафтных и почвенных факторов. В условиях открытого полевого ландшафта, где таяние снега происходит интенсивно, наблюдается мощный пик на графиках стока; в лесу он менее выражен и смещен по времени за счет более позднего снеготаяния (рис. 2а). По результатам моделирования видно, что на тяжелосуглинистых почвах независимо от ландшафта затрудненные условия впитывания влаги способствуют образованию поверхностного стока круглый год, а доля весеннего стока составляет порядка 50%, в то время как на песчаных почвах она достигает 90%. Максимальные различия в расчетном стоке весеннего половодья в зависимости от почвенного покрова отмечаются в лесном ланд-

шафте – весенний сток на суглинистых почвах почти в 3 раза выше, чем на песчаных. Это подтверждается результатами сопоставления суммарного речного стока на лесных водосборах с разным почвенным покровом [14].

В целом, результаты моделирования показывают, что в лесу годовая сумма поверхностного стока существенно ниже, чем в поле (табл. 2). Это, однако, не означает, что лес оказывает “иссушающее” воздействие на территорию. Многочисленными данными наблюдений подтверждается, что весенний сток на полевых водосборах превышает аналогичные значения в лесных условиях в 2–3 раза, а в лесостепной и степной зонах – и более [2, 14]. Вместе с тем, суммарный речной сток с водосбора может как увеличиваться, так и уменьшаться с ростом лесистости [5], поскольку основная водорегулирующая роль леса заключается в перераспределении стока между подземной и поверхностной составляющими.

Влага, доступная для впитывания

Рассмотренные выше различия условий формирования поверхностного испарения и стока обуславливают разные объемы влаги, доступные для впитывания в почву и формирования инфильтрационного питания подземных вод, которые в среднем закономерно возрастают с ростом годовой суммы осадков с юга на север как в абсолютных значениях, так и в процентах от годовой суммы осадков (с 79 до 85%).

Максимальные значения доступной для впитывания влаги характерны для лесного ландшафта с песчаными почвами, а минимальные – для поля и суглинистых почв (табл. 2). Из графиков видно, что именно в весенний период за счет затрудненного стока талой воды в лесу формируются благоприятные условия для впитывания влаги в почву и формирования инфильтрационного питания (рис. 2б). Это подтверждается данными наблюдений на Истринском стационаре [3] и Подмосковной водно-балансовой станции [11], согласно которым в лесу до 80% суммы снегозапасов и жидких осадков за половодье задерживается на водосборе.

Испарение из почвы

Для лесного ландшафта сумма годового испарения из почвы под пологом леса определяется, главным образом, характером почвенного покрова и практически не зависит от состава подстилающих пород зоны аэрации (табл. 3). В условиях полевого ландшафта, где испарение из почвы – основная составляющая суммарного испарения, картина несколько иная. Максимальные величины годового испарения характерны для суглинистых почв, где они практически соответствуют потенциальным значениям и почти не зависят от состава подстила-

ющих материнских пород. Для супесчаных и песчаных почв величины испарения закономерно снижаются, причем, минимальные значения характерны для песчаного состава нижележащих пород зоны аэрации (табл. 3). Такая закономерность объясняется тем, что на поверхности песчаных почв, обладающих низкими капиллярными свойствами, быстро образуется сухой слой, выполняющий мульчирующую роль и уменьшающий испарение [2].

Внутригодовой ход суточного испарения из почвы при различных ландшафтных и геолого-почвенных условиях отражает график на рис. 3а. При положительных температурах воздуха в годовом цикле отмечаются два максимума. Первый, весенний, соответствует началу роста среднесуточных температур воздуха, когда транспирация растительностью еще не достигла полной силы. Вслед за этим максимумом наступает заметный спад почвенного испарения, связанный с интенсивным развитием растительного покрова и увеличением транспирации. Второй максимум соответствует началу осени. В этот период еще относительно высоких среднесуточных температур растительный покров деградирует и транспирация влаги практически прекращается; при этом почва хорошо прогревается и испарение из нее заметно возрастает. В средней полосе России это время соответствует наступлению “бабьего” лета и характеризуется высокой температурой воздуха и утренними туманами.

Транспирация

В целом рассматриваемые различия метеорологических условий обуславливают лишь незначительное увеличение транспирации пропорционально росту годовых сумм осадков. Анализ расчетных среднегодовых значений транспирации растительностью в зависимости от ландшафтных и геолого-почвенных условий на поверхности (табл. 3) показывает, что годовая сумма транспирации растительностью в лесу значительно выше, чем в поле; максимальная разница отмечается на суглинистых почвах, где корневая система полевой растительности наименее развита. Несмотря на то что потенциальная потребность во влаге у травянистых растений выше, величина транспирации определяется, главным образом, способностью использовать ее запасы в почве за счет корневой системы [2], которая более развита у древесной растительности. Годовые значения транспирации как в поле, так и в лесу существенно возрастают с увеличением песчаности верхней части разреза, что также, очевидно, обусловлено лучшим развитием корневой системы растений в песчаных и супесчаных почвах. Худшие условия для транспирации характерны для суглинистых почв и почти не зависят от состава подстилающих ее отложений. В песчаных и супесчаных почвах с хорошо развитой корневой системой транспирация как в лесу, так и в поле несколько воз-

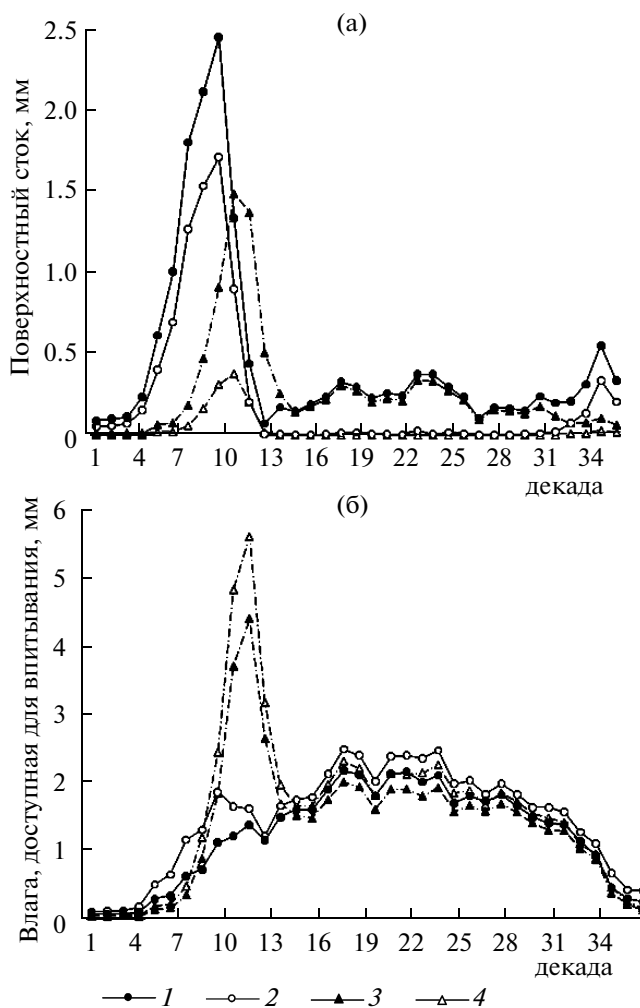


Рис. 2. Внутригодовая изменчивость среднедекадных значений слоя поверхностного стока (а) и влаги, доступной для впитывания (б), при различных ландшафтных и почвенных условиях. Поле: 1 – суглинки, 2 – пески; лес: 3 – суглинки, 4 – пески.

растает при увеличении глинистости подстилающих отложений (табл. 3). Это вызвано, очевидно, тем, что относительно более слабопроницаемые отложения под почвой удерживают в ней влагу и обеспечивают более интенсивное ее поглощение корнями растений.

Анализ годового распределения суточных величин транспирации (рис. 3б) показывает, что в холодные периоды года они близки к нулю. Это характерно для полевого ландшафта, где практически вся растительность зимой деградирует. В условиях леса реальная транспирация в этот период составляет ~5% суммарного зимнего испарения [14] и также незначительна. В середине вегетационного периода в условиях полевого ландшафта наблюдается некоторое смещение максимума транспирации – приблизительно на месяц. Это объясняется тем, что на открытых пространствах в начальный период ле-

Таблица 3. Расчетные показатели среднегогодового годового водного баланса зоны аэрации при глубоком залегании уровня грунтовых вод (>5м)

Тип почвы, породы зоны аэрации	Составляющие годового водного баланса зоны аэрации, мм			
	впитывание, v	испарение из почвы, E_p	транспирация, TR_p	инфильтрация, W
Лес				
Суглинистая	488			
глины		102	307	78
суглинки		101	299	88
супеси		101	299	88
пески		101	297	89
Супесчаная	538			
глины		91	364	83
суглинки		88	345	105
супеси		88	327	123
пески		88	329	120
Песчаная	572			
глины		77	385	109
суглинки		77	376	119
супеси		77	354	141
пески		77	357	138
Поле				
Суглинистая	446			
глины		357	67	21
суглинки		359	64	23
супеси		358	59	30
пески		357	59	30
Супесчаная	474			
глины		343	96	36
суглинки		340	92	42
супеси		331	82	61
пески		337	79	58
Песчаная	531			
глины		320	150	60
суглинки		315	144	72
супеси		293	130	108
пески		298	133	100

та влага более интенсивно расходуется на испарение из почвы (рис. 3а).

Инфильтрационное питание

Итог проведенного моделирования — оценка среднегогодовых величин инфильтрационного питания подземных вод. При рассматриваемых ме-

теоклиматических условиях территории юго-западной части МАБ годовой слой инфильтрационного питания при идентичности условий на поверхности возрастает с увеличением осадков в среднем с 11 до 15% их годовой суммы.

Результаты моделирования позволили количественно оценить влияние ландшафтных условий на формирование инфильтрации (табл. 3). Минималь-

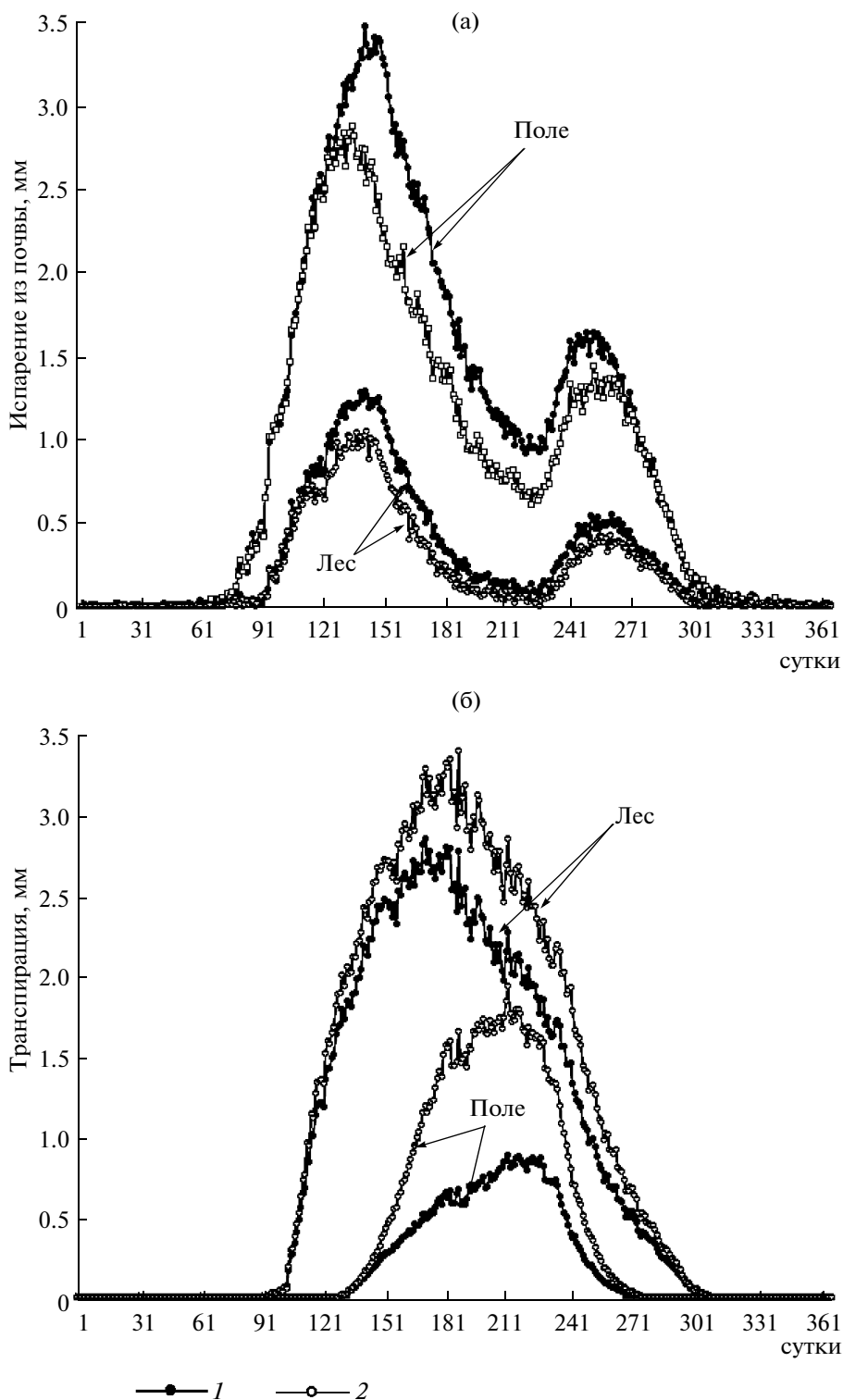


Рис. 3. Годовая динамика суточных величин испарения из почвы (а) и транспирации (б) для различных ландшафтных и геолого-почвенных условий при глубоком залегании УГВ (здесь и на рис. 4 1 – суглинки, 2 – пески).

ные значения инфильтрации характерны для полевых ландшафтов при глинистом составе почвы и подстилающих пород зоны аэрации. По мере увеличения песчаности разреза величины среднегодо-

вого инфильтрационного питания закономерно возрастают. Наиболее благоприятные условия формирования инфильтрации подземных вод характерны для лесных ландшафтов с песчаным разрезом

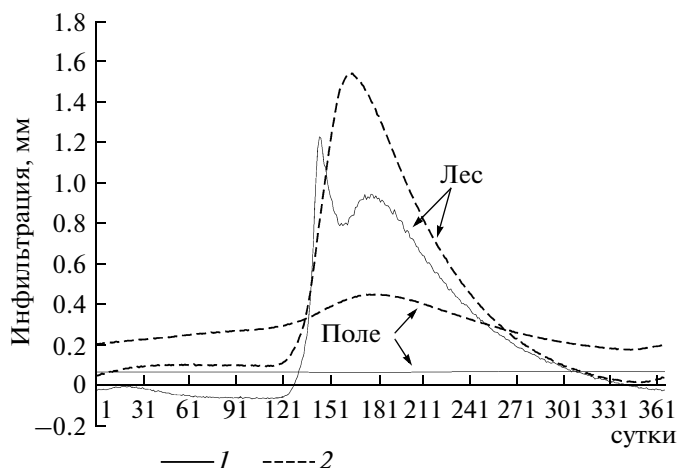


Рис. 4. Внутригодовая динамика суточных величин инфильтрации для различных ландшафтных и геолого-почвенных условий при глубоком залегании УГВ.

почвы и зоны аэрации, что обуславливает отмечаемое многими авторами увеличение фактически наблюдаемого меженного стока по мере увеличения лесистости водосборов [14]. Следует отметить, что состав подстилающих почву пород зоны аэрации влияет на величину инфильтрации гораздо меньше, чем сама почва (табл. 3), что отмечалось и ранее [8].

По мере увеличения глинистости разреза почвы и зоны аэрации внутригодовая изменчивость инфильтрации существенно снижается (рис. 4). Если при песчаном разрезе в лесу питание формируется “импульсно” — главным образом, в весенне-летний период, то в полевых условиях оно распределено более равномерно, а при глинистом составе отложений — практически постоянно в течение года (рис. 4).

Оценка роли глубины залегания УГВ в формировании инфильтрации проведена на основе моделирования рассматриваемых вариантов типовых природных условий при различных заданных величинах напора на нижней границе модели, что соответствует разной среднегодовой глубине УГВ. Характерный вид расчетных кривых зависимости инфильтрационного питания W от глубины УГВ $Z_{\text{УГВ}}$ (рис. 5) соответствует известным типовым зависимостям следующего вида [15]:

$$W = W_p - (W_p - W_0)e^{-z_{\text{УГВ}}/z_0}, \quad (1)$$

где W_p — постоянная величина питания при глубоком залегании УГВ, а Z_0 и W_0 — константы, причем, значение W_0 соответствует величине питания при $Z_{\text{УГВ}} = 0$.

Анализ результатов моделирования показывает, что физическая причина такой нелинейной зависимости — перестройка структуры водного баланса зоны неполного насыщения в зависимости от глуби-

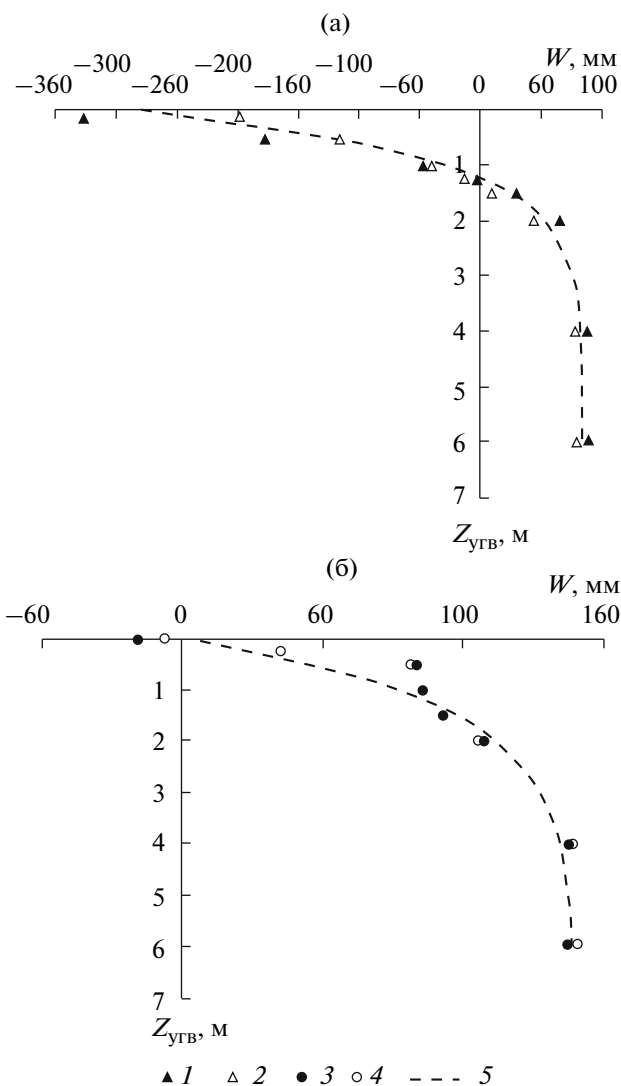


Рис. 5. Типичные расчетные зависимости инфильтрации W от глубины залегания УГВ $Z_{\text{УГВ}}$ для суглинистого (а) и песчаного (б) разреза на примере лесного ландшафта. 1 — суглинки, 2 — суглинки на глинах, 3 — пески, 4 — пески на супесях, 5 — аппроксимирующая кривая.

ны залегания УГВ. По мере сокращения мощности и емкости зоны аэрации, что обуславливает ее более интенсивное промачивание, поток влаги быстрее достигает УГВ и инфильтрационное питание приобретает все более “импульсный” характер (рис. 6а). Одновременно с этим, по мере увеличения влажности зоны аэрации возрастает величина транспирации (рис. 6б) и испарения из почвы (до определенного предела, соответствующего потенциальной эвапотранспирации). Это приводит к возникновению в летнее время восходящего потока влаги с УГВ — отрицательных величин инфильтрации. Однако в годовом балансе в целом нисходящий поток больше, что формирует среднегодовое питание подземных вод. Дальнейшее сокращение ин-

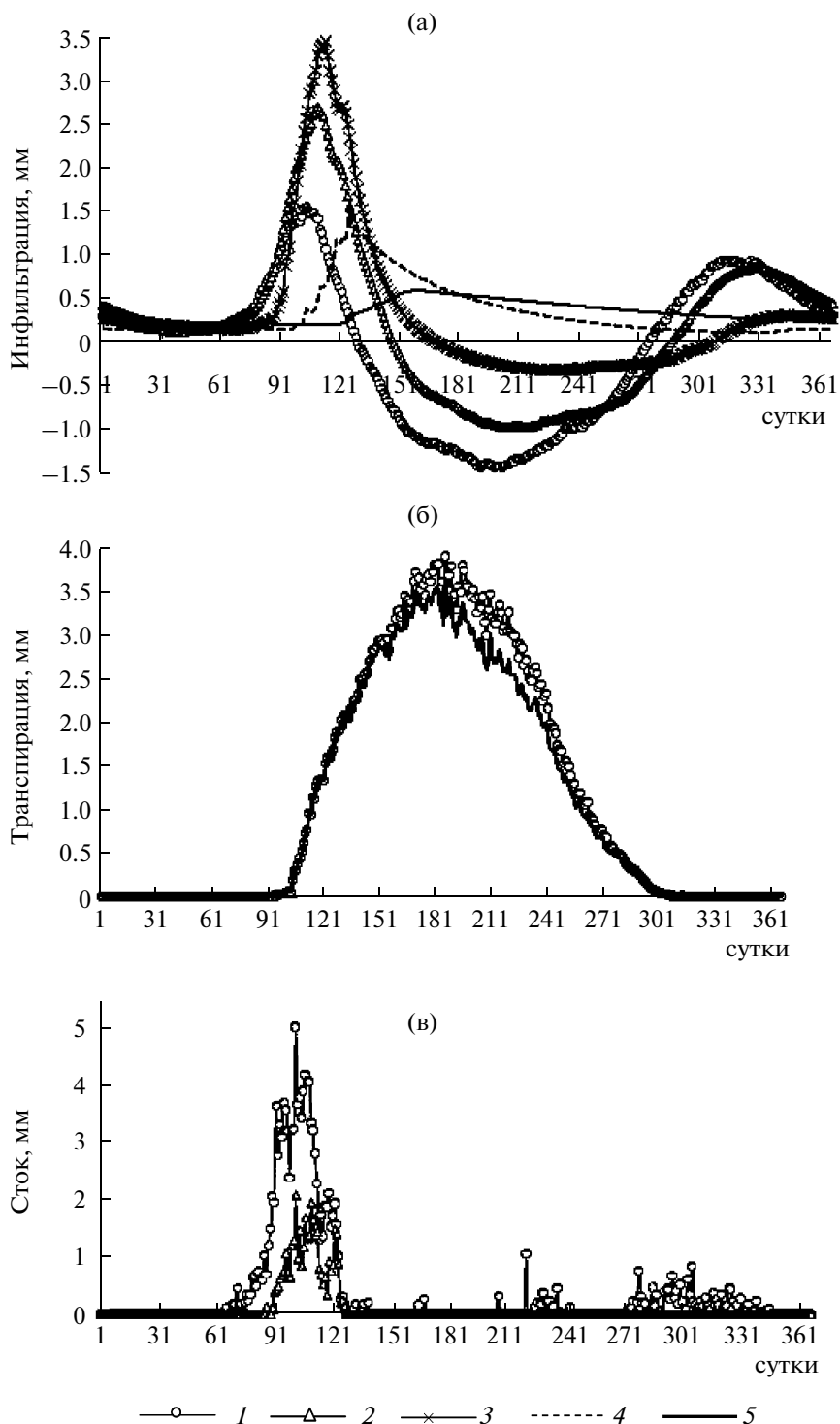


Рис. 6. Годовая динамика составляющих водного баланса зоны аэрации: инфильтрации (а), транспирации (б), поверхностного стока (в) при различной глубине залегания УГВ на примере лесного супесчано-суглинистого разреза. Глубина до УГВ: 1 – 0.5 м, 2 – 1, 3 – 2, 4 – 4, 5 – 6 м.

фильтрации при еще более малых глубинах УГВ обусловлено уменьшением свободной поглощающей емкости зоны аэрации и ее “впитывающей способности”; при этом “излишки” влаги на по-

верхности формируют “дополнительный” (к рассчитанному ранее, на первом этапе моделирования) поверхностный сток (рис. 6в). Это приводит к тому, что в годовом балансе отбор влаги за счет эвапо-

Таблица 4. Параметры зависимости среднесуточной величины питания W от глубины залегания УГВ $Z_{\text{УГВ}}$ для различных условий на территории Калужской обл.

Тип почвы	Породы зоны аэрации	Параметры зависимости $W(Z_{\text{УГВ}})$			$Z_{\text{УГВ}}$, м, при $W = 0$
		W_p , мм	W_0 , мм	Z_0 , м	
Лес					
Суглинистая	Глины, суглинки	83	–300	0.80	1.22
	Супеси, пески	89	–150	1.00	0.99
Супесчаная	Глины, суглинки	95	–250	0.80	1.03
	Супеси, пески	123	10	1.40	<0
Песчаная	Глины, суглинки	114	–220	0.60	0.64
	Супеси, пески	140	0	1.25	0.00
Поле					
Суглинистая	Глины, суглинки	22	–350	0.60	1.70
	Супеси, пески	30	–250	1.20	2.68
Супесчаная	Глины, суглинки	39	–320	0.55	1.22
	Супеси, пески	60	–170	1.35	1.81
Песчаная	Глины, суглинки	66	–280	0.63	1.04
	Супеси, пески	104	–100	1.10	0.74

транспирации превышает ее поступление, и формируется отрицательная годовая сумма инфильтрационного питания, отвечающая условиям разгрузки подземных вод (рис. 5а).

Примечательно, что в песчаных разрезах, обладающих высокой поглощающей емкостью почвы и зоны аэрации, картина несколько иная. При неглубоком залегании УГВ и высокой влажности почвы, когда суммарная эвапотранспирация уже достигла максимальных потенциальных значений и остается постоянной (рис. 6б), поглощающая способность почвы еще не соответствует своим предельным значениям. В этом случае вся влага, поступившая на поверхности почвы, за вычетом потенциальной эвапотранспирации идет на формирование нисходящего потока. Это приводит к тому, что в определенном интервале незначительных глубин УГВ, пока поглощающая емкость песчаного разреза не достигнет предельных значений, сумма годового питания остается постоянной (рис. 5б). Такие условия, особенно в наиболее высокопроницаемых песчаных разрезах лесного ландшафта, обуславливают превалирование нисходящего потока влаги и сохранение практически постоянной положительной годовой суммы инфильтрационного питания даже при небольшой глубине УГВ. В этом случае аппроксимация зависимости $W(Z_{\text{УГВ}})$ уравнением (1) при малых глубинах до УГВ приводит к существенным ошибкам (рис. 5б).

Анализ полученных расчетных кривых $W(Z_{\text{УГВ}})$ для различных ландшафтных и геолого-почвенных условий показывает, что их вид слабо меняется в зависимости от состава материнских пород зоны аэрации (рис. 5). Различия проявляются только при

“контрастной” смене подстилающих почву отложений. Эта же закономерность прослеживается и при анализе предельных величин питания W_p при глубоком залегании УГВ (табл. 4). Таким образом, результаты моделирования подтверждают определяющую роль верхнего почвенного слоя зоны аэрации в формировании инфильтрационного питания [8].

Полученные расчетные параметры зависимости (1) показывают, что с увеличением песчаности разреза почвы и зоны аэрации значения параметров W_0 и Z_0 возрастают, а критическая глубина УГВ, при которой условия питания сменяются на условия разгрузки подземных вод, снижается (табл. 4). Немного меньше (в среднем) значения параметров W_0 и Z_0 для условий полевых ландшафтов по сравнению с лесными, а критическая глубина УГВ наоборот возрастает. Это означает, что суглинистый состав почвы и зоны аэрации обуславливает большую зависимость среднесуточного инфильтрационного питания от глубины залегания УГВ. Наиболее благоприятные условия для разгрузки подземных вод эвапотранспирацией при неглубоком залегании их уровня присущи открытым полевым ландшафтам при суглинистом разрезе почвы и зоны аэрации. Здесь разгрузка подземных вод происходит даже при глубине УГВ 2.0–2.5 м (табл. 4). В то же время, в условиях закрытых лесных ландшафтов разгрузка подземных вод испарением возможна только при суглинистом разрезе и незначительных (в среднем до 1 м) глубинах УГВ. При песчаном разрезе почвы и зоны аэрации, как правило, вне зависимости от глубины УГВ происходит их инфильтрационное питание.

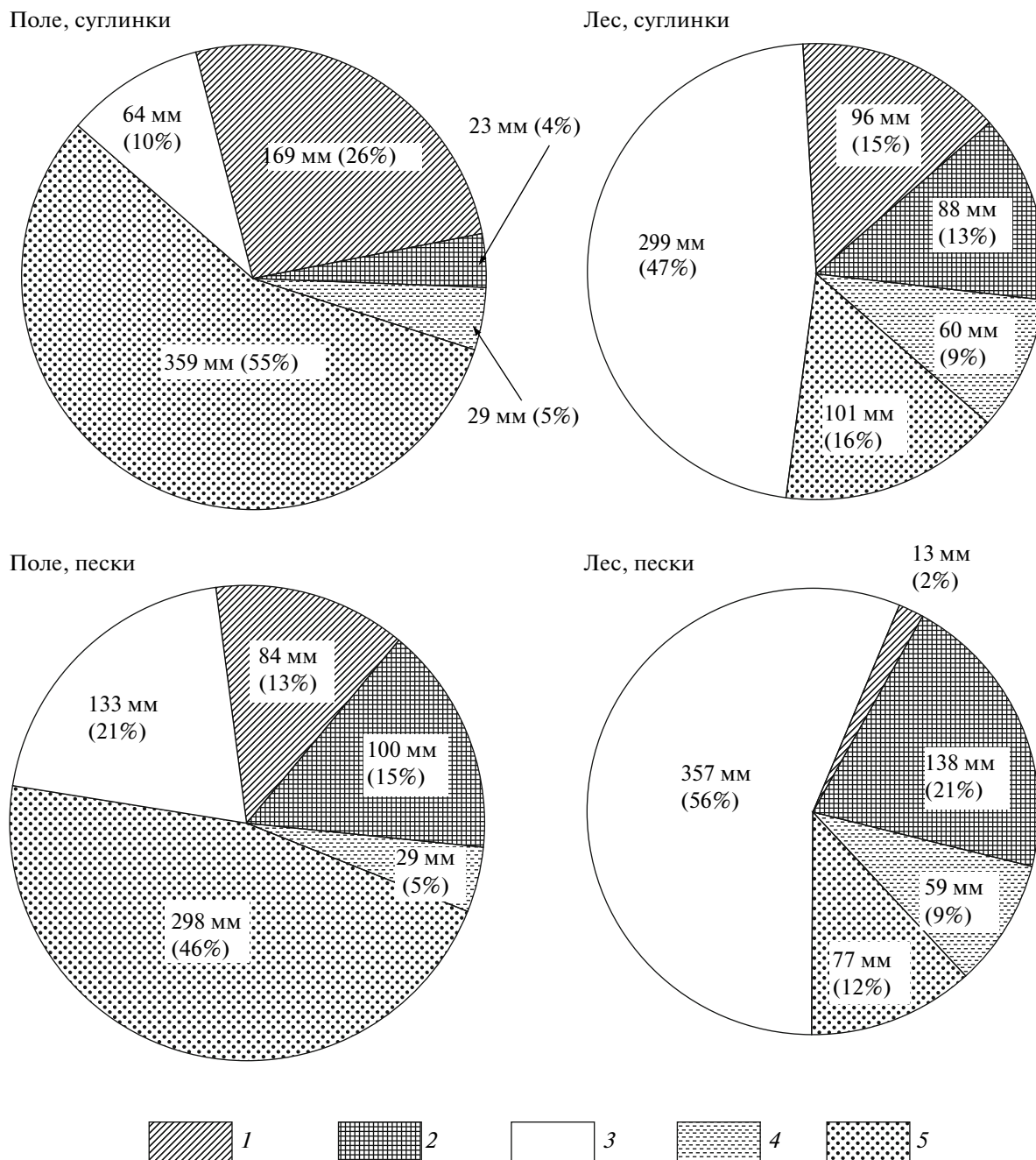


Рис. 7. Сопоставление расчетных показателей годового водного баланса, мм слоя и % осадков, для различных ландшафтных и геолого-почвенных условий при глубоком залегании УГВ. 1 – поверхностный сток, 2 – инфильтрация, 3 – транспирация, 4 – поверхностное испарение, 5 – испарение из почвы.

ВЫВОДЫ

Количественные показатели среднегогодового годового водного баланса в целом и инфильтрационного питания подземных вод в частности существенно отличаются в зависимости от конкретных природных условий территории. В большей степени эти различия связаны с ландшафтными и геолого-почвенными характеристиками, в меньшей – с метеоклиматическими. В среднем, различия метеоро-

логических условий в пределах рассматриваемой территории юго-западной части МАБ приводят к изменчивости инфильтрационного питания от 60 до 100 мм/год. В то же время, за счет неоднородности ландшафтных, почвенных и гидрогеологических условий величины питания могут меняться от 0 до 160 мм/год. Более того, участки с близким к поверхности залеганием УГВ характеризуются отрицательными годовыми значениями питания, что со-

ответствует условиям разгрузки подземных вод. Средние значения годовых сумм инфильтрационного питания подземных вод имеют четко выраженную тенденцию к увеличению с ростом осадков и уменьшением среднегодовых температур как в абсолютных величинах, так и в относительных показателях – в долях осадков (с 11 до 15%) и суммарного стока (с 45 до 50%).

Характерно, что среднемноголетние показатели суммарной эвапотранспирации и суммарного стока (сумма инфильтрации и поверхностного стока) слабо зависят от ландшафтных и геолого-почвенных условий. В зависимости от сочетания ландшафтных и геолого-почвенных условий в пределах рассматриваемой климатической зоны суммарный сток составляет 23–30% осадков, а суммарная эвапотранспирация 70–77% (рис. 7). Примерно такой же диапазон их изменчивости обусловлен и метеорологическими факторами. Ландшафтные и геолого-почвенные условия существенно влияют лишь на соотношения между поверхностным и подземным стоком (инфильтрацией) и между различными составляющими суммарной эвапотранспирации (поверхностное, почвенное испарение и транспирация).

Вышеприведенные выводы относятся, главным образом, к наиболее распространенным территориям со значительной (>3 м) глубиной залегания УГВ. При небольших глубинах УГВ, которые характерны, главным образом, для речных долин, соотношения между отдельными статьями водного баланса несколько иные – сокращается (вплоть до 0) инфильтрационное питание подземных вод, увеличивается суммарная эвапотранспирация и поверхностный сток.

Сопоставление результатов проведенной оценки отдельных составляющих среднемноголетнего водного баланса с опубликованными данными фактических наблюдений как на уровне годовых показателей, так и во внутригодовой динамике указывает на адекватное отражение в расчетных моделях природных процессов формирования инфильтрационного питания подземных вод. Таким образом, модельно-ориентированный подход – перспективный для оценки среднемноголетних величин инфильтрации и их площадной неоднородности, обусловленной различием ландшафтных, почвенных и гидрогеологических условий территории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Воронков Н.А.* Роль лесов в охране вод. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 285 с.
2. *Воронков Н.А.* Элементы водного баланса леса в зависимости от почвенно-грунтовых условий и породного состава насаждений // Вопросы географии. Ландшафт и воды. М.: Мысль, 1986. Сб. 102. С. 122–133.
3. Гидрологическая роль лесных геосистем. Новосибирск: Наука, 1989. 168 с.
4. *Гринеvский С.О., Поздняков С.П.* Принципы региональной оценки инфильтрационного питания подземных вод на основе геогидрологических моделей // Вод. ресурсы. 2010. Т. 37. № 5. С. 543–557.
5. *Идзон П.Ф., Пименова Г.С., Цыганова О.П.* Количественные характеристики водоохраной и водорегулирующей роли леса // Влияние леса на водные ресурсы. М.: Наука, 1986. С. 3–43.
6. *Кучмент Л.С., Гельфан А.Н.* Динамико-стохастические модели формирования речного стока. М.: Наука, 1993. 101 с.
7. *Молчанов А.А.* Влияние леса на окружающую среду. М.: Наука, 1973. 359 с.
8. *Пашковский И.С.* Разработка геофильтрационных моделей системы “зона аэрации – грунтовые воды” и их применение при изучении взаимосвязи подземных и поверхностных вод. Дис. ... докт. геол.-минер. наук. М.: МГУ, 1985. 406 с.
9. *Пьявченко Н.И., Сабо Е.Д.* Основы гидроресурсоулучшения. М.: Гослесбуиздат, 1962. 381 с.
10. *Созыкин Н.Ф.* Физические условия водного режима лесных почв // Водный режим лесных почв. М.: 1955. С. 3–38.
11. *Субботин А.И.* Сток талых и дождевых вод (по экспериментальным данным). М.: Гидрометеоиздат, 1966. 374 с.
12. *Субботин А.И.* Влияет ли лес на осадки? // Лесоведение. 1979. № 5. С. 13 – 18.
13. *Субботин А.И., Дыгало В.С.* Экспериментальные гидрологические исследования в бассейне реки Москвы. М.: Гидрометеоиздат, 1991. 262 с.
14. *Федоров С.Ф.* Исследование элементов водного баланса в лесной зоне Европейской территории СССР. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 264 с.
15. *Шестаков В.М., Пашковский И.С., Соифер А.М.* Гидрогеологические исследования на орошаемых территориях. М.: Недра, 1982. 244 с.
16. *Шестаков В.М., Поздняков С.П.* Геогидрология. М.: Академкнига, 2003. 173 с.
17. *Schroeder P.R., Dozier T.S., Zappi P.A. et al.* The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model: Engineering Documentation for Version 3. EPA/600/R-94/168b. Washington, 1994. 116 p.
18. *Šimůnek J., van Genuchten M.Th., Šejna M.* The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Version 3.0. Riverside: Department of Environmental Sciences University of California Riverside, 2005. 270 p.