

УДК 556.14:556.332.2:556.136:556.164

С.О. Гриневский<sup>1</sup>

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ ВЛАГИ КОРНЯМИ РАСТЕНИЙ ПРИ РАСЧЕТАХ ВЛАГОПЕРЕНОСА В ЗОНЕ АЭРАЦИИ И ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО ПИТАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД<sup>2</sup>

Рассмотрены модели транспирационного поглощения влаги корнями растений и принципы обоснования их параметров при расчетах влагопереноса в зоне аэрации и оценке инфильтрационного питания подземных вод. На основе анализа природных закономерностей формирования водного баланса зоны аэрации и чувствительности транспирационных моделей обоснована возможность использования обобщенных параметров для различных ландшафтных и почвенных условий. Даны рекомендации по выбору моделей транспирационного поглощения влаги и обоснованию их параметров, что позволяет минимизировать погрешности оценки инфильтрационного питания подземных вод.

*Ключевые слова:* водный баланс, транспирация, зона аэрации, влагоперенос, моделирование, инфильтрационное питание.

The comparison of two models of root water uptake in vadoze zone with different root distribution functions for groundwater infiltration recharge estimation was considered. On the base of transpiration process analysis and model sensitivity assessment the generalized parameters of root water uptake model were obtained for different landscape and soil conditions. Proper choice of root water uptake model and method of its parameter estimation allows to reduce errors of groundwater infiltration recharge estimation based on unsaturated flow modeling.

*Key words:* vadose zone, transpiration, root water uptake, unsaturated flow modeling, groundwater recharge, infiltration.

**Введение.** Отбор влаги корнями растений и ее последующая транспирация играют значительную роль в процессе формирования инфильтрационного питания подземных вод и при определенных условиях могут составлять главную расходную статью водного баланса зоны аэрации в целом [Гриневский, Новоселова, 2011]. Первопричина «транспирационного» движения влаги — ее испарение из растений в атмосферу, в водном балансе зоны аэрации оно формирует восходящий поток влаги, противоположный (по знаку) нисходящему инфильтрационному. Этот сложный природный процесс зависит от ряда биологических, метеорологических, гидролого-гидрогеологических и почвенных факторов [Судницын, 1979] и рассматривается в разных научных направлениях, а для его моделирования необходимо знание множества параметров и характеристик, получение которых нередко требует постановки специальных уникальных наблюдений, недоступных при региональном характере исследований.

Для региональной оценки инфильтрационного питания подземных вод на основе моделирования трансформации атмосферной влаги на поверхности земли и ее последующего переноса до уровня грунтовых вод (УГВ) [Гриневский, Поздняков, 2010] необходимо схематизировать процесс транспирационного отбора влаги, проанализировать возможности расчетных

моделей транспирации и разработать принципы их параметрического обеспечения для типовых («контрастных») природных условий формирования водного баланса зоны аэрации. В контексте решаемой задачи главный критерий проведения такой схематизации — отражение основных природных закономерностей процесса поглощения влаги корнями растений в различных условиях. При этом обоснование обобщенных (усредненных) параметров процесса и возможности их использования должны базироваться на анализе чувствительности моделей по отношению к итоговой расчетной величине инфильтрационного питания подземных вод.

**Общая модель транспирационного отбора влаги.** В исходном уравнении одномерной вертикальной насыщенно-ненасыщенной фильтрации от поверхности земли до УГВ отбор влаги корнями растений представлен дифференцированной в вертикальном разрезе и переменной во времени функцией, зависящей от глубины ( $z$ ) и высоты всасывающего давления влаги ( $h$ ) в данном интервале разреза,  $tr(z, t, h)$ :

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( k_w(\omega) \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right) - tr(z, t, h), \quad (1)$$

где  $\omega$  — объемная влажность пород,  $k_w$  — коэффициент влагопереноса.

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, геологический факультет, кафедра гидрогеологии, канд. геол.-минер. н., доцент, e-mail: sogrin@geol.msu.ru

<sup>2</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 08-05-00720-а).

Распределение транспирационного поглощения влаги по глубине описывается в пределах мощности корневой зоны ( $m_r$ ) пропорционально относительной плотности (концентрации) корней ( $b(z)$ ), и интегральная величина ( $TR$ ) может изменяться от нуля до величины потенциальной транспирации ( $TR^0$ ), зависящей главным образом от метеорологических условий [Šimůnek et al., 2009]:

$$\left. \begin{aligned} tr(z, t, h) &= TR^*(z, t)\psi(h); & 0 < z \leq m_r: & TR^*(z, t) = b(z)TR^0(t); \\ & & z > m_r: & TR^*(z, t) = 0; \\ \int_{m_r} b(z) &= 1; & 0 < \psi(h) < 1; \\ TR(t) &= TR^0(t) \int_{m_r} b(z)\psi(h)dz. \end{aligned} \right\} (2)$$

Потенциальная транспирация ( $TR^0$ ) — часть общей потенциальной эвапотранспирации ( $ET^0$ ), которая определяется по данным суточных значений температуры и солнечной радиации согласно зависимости Пенмана–Монтейна и характеризует теплоэнергетический потенциал ландшафта [Будаговский, 1981; Novak, Havrila, 2005]:

$$TR^0(t) = ET^0(t)[1 - \exp(-\delta LAI(t))], \quad (2a)$$

где  $LAI(t)$  — индекс развития листьев, а  $\delta$  в зависимости от типа растительности принимает значения от 0,45 до 0,55. Оставшаяся часть  $ET^0$  формирует физическое испарение с поверхности почвы.

Таким образом, при известной величине потенциальной транспирации расчетная модель поглощения влаги корнями растений включает две частные модели: 1) модель изменчивости транспирационной способности растений в зависимости от влажности почвы (потенциала почвенной влаги), т.е. функцию  $\psi(h)$ , и 2) модель распределения корневой системы по глубине, т.е. функцию  $b(z)$ .

#### Модели транспирационной способности растений.

Поскольку при неполном водонасыщении высота всасывающего давления влаги ( $h$ ) — величина отрицательная, для удобства изложения используется также обратное понятие — высота всасывания  $|h|$ , которая положительна. Как следует из (2), транспирационная способность растений — функция  $\psi(h)$  — представляет собой зависимость относительной транспирации  $TR/TR^0$  от высоты всасывания (или влажности), которая имеет следующие закономерности [Судницын, 1979].

При высокой доступности почвенной влаги особенности растений как живых организмов, ее потребляющих и отводящих в атмосферу, практически не проявляются. В этом случае изменение влагопроводности почвы компенсируется ростом градиента давления около поглощающей поверхности корней, и плотность подтока влаги остается на постоянном уровне, а транспирация равна потенциальной величине ( $\psi(h) = 1$ ) и зависит главным образом от метеоро-

логических факторов. Высокая доступность влаги для растений определяется водно-физическими свойствами почвы и соответствует влажности выше наименьшей (полевой) влагоемкости, что в среднем отвечает всасывающему давлению  $\sim 33$  кПа ( $h \approx -3,36$  м).

При более низкой величине влажности (менее полевой влагоемкости) влагопроводность почвы резко уменьшается. Градиент давления влаги вблизи корня продолжает увеличиваться, но недостаточно для полной компенсации снижения влагопроводности, что приводит к постепенному снижению плотности подтока влаги к корням. Это вызывает сокращение влагосодержания самого растения и частичное закрытие его устьиц, посредством которых осуществляется отвод влаги в атмосферу, т.е. снижение транспирации. Такое водно-физическое состояние почвы далее называется критическим, а соответствующая влажность почвы примерно соответствует наименьшей влагоемкости. Характер снижения транспирационной способности растений от потенциала почвенной влаги на этом этапе имеет логарифмический вид [Судницын, 1979].

Нижний предел доступной для растений влаги, когда ее подток к корню сокращается до величины, не способной обеспечить жизнедеятельность растения, и прекращается транспирация ( $\psi(h) = 0$ ), соответствует влажности устойчивого завядания, которая является как биологической характеристикой растения, так и водно-физическим параметром почвы. Диапазон соответствующего давления почвенной влаги достаточно широк — от 600 до 2500 кПа — и зависит от видовых свойств растения [Судницын, 1979], однако при отсутствии специальных экспериментальных определений в расчетах используют среднее значение — 1500 кПа ( $h \approx -153$  м) [Novak, Havrila, 2006; Schaap et al., 2001].

Рассмотренные выше закономерности изменения транспирационной способности растений описаны двумя наиболее распространенными численными моделями.

**Модель Феддеса** [Feddes et al., 1974]. Согласно этой модели, реальная транспирация равна потенциальной ( $\psi(h) = 1$ ) в интервале высоты всасывающего давления от  $h_1$  до  $h_2$  и линейно падает до нуля при ее уменьшении до величины  $h_3$ , которой соответствует влажность завядания. При увлажнении почвы, близком к ее полному водонасыщению ( $h_0 \approx 0$ ), в ней могут формироваться анаэробные условия, приводящие к отмиранию корней и снижению транспирации до нуля (рис. 1). Кроме того, модель Феддеса учитывает, что критическое состояние почвы, при котором происходит снижение транспирационной способности растений, зависит от климатических условий. Согласно работе [Судницын, 1979], увеличение потенциальной транспирации на 1 мм/сут приводит к уменьшению критической высоты всасывания  $|h_2|$ , при которой начинает сокращаться транспирация, в среднем на 0,7 м. Таким образом, критическая высота

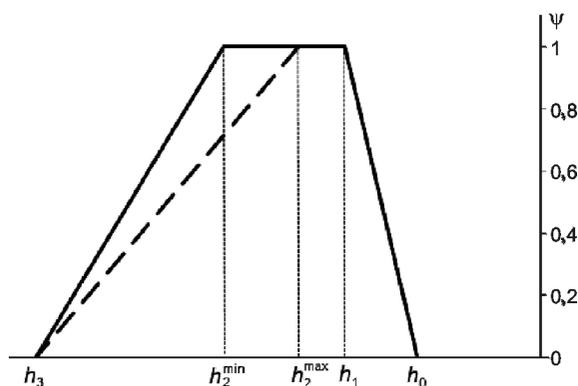


Рис. 1. Транспирационная модель Феддеса

всасывающего давления  $h_2$  в модели Феддеса может меняться от значения  $h_2^{\max}$ , соответствующего максимальной потенциальной транспирации ( $TR_{\max}^0$ ), до величины  $h_2^{\min}$ , отвечающей минимальным суточным величинам ( $TR_{\min}^0$ ) (рис. 1). В интервале суточных значений потенциальной транспирации от  $TR_{\max}^0$  до  $TR_{\min}^0$  критическая высота всасывающего давления ( $h_2$ ) вычисляется следующим образом [Feddes et al., 1974; Šimůnek et al., 2009]:

$$h_2 = h_2^{\max} + \frac{h_2^{\min} - h_2^{\max}}{TR_{\max}^0 - TR_{\min}^0} (TR_{\max}^0 - TR^0). \quad (3)$$

Таким образом, транспирационная модель Феддеса описывается пятью параметрами, характеризующими различную поглощающую способность корней растений. В упрощенной форме и без учета анаэробных условий модель Феддеса может быть описана только двумя параметрами  $h_2 = h_2^{\max} = h_2^{\min} \approx -3,3$  м и  $h_3 \approx -153$  м, что отвечает наименьшей влагоемкости почвы и влажности завядания соответственно.

Более дифференцированные подходы к определению параметров модели Феддеса получены по данным экспериментальных определений критической влажности почвы  $\omega_2$  в зависимости от величины суточной потенциальной транспирации  $TR^0$  [Novak, Navrila, 2006]:

$$\omega_2 = 1/a + \omega_{вз}, \quad a = -2,27TR^0 + 17,5, \quad (4)$$

где  $\omega_{вз}$  — влажность завядания. Величины  $h_2^{\max}$  и  $h_2^{\min}$  находятся далее по кривой связи влажности и высоты давления (основной гидрофизической характеристики — ОГХ) при использовании в (4) соответствующих значений  $TR^0$ , мм/сут.

Схожий подход к оценке критической величины потенциала почвенной влаги предложен И.С. Пашковским [Пашковский, 1985]:

$$\log |h_2| = 4,4 - 0,185TR^0 \quad (5)$$

при значении  $h_2$ , выраженном в см, а  $TR^0$  — в мм/сут.

В работе [Li et al., 2006], учитывая нелинейность ОГХ и ее различие для разных типов почв, предлагается оценивать начало падения транспирационной способности растений ( $\psi < 1$ ), когда

$$\frac{\sqrt{h^* \omega^*}}{TR^0 / TR_{\max}^0} < 1, \quad h^* = \frac{h - h_{вз}}{h_{нв} - h_{вз}}, \quad \omega^* = \frac{\omega - \omega_{вз}}{\omega_{нв} - \omega_{вз}}, \quad (6)$$

где  $\omega_{нв}$  и  $\omega_{вз}$  — наименьшая влагоемкость и влажность завядания, а  $h_{нв}$  и  $h_{вз}$  — соответствующие значения высоты всасывающего давления. При этом линейная связь между значениями  $\sqrt{h^* \omega^*}$  и  $TR^0 / TR_{\max}^0$  подтверждена экспериментальными данными [Denmead, Shaw, 1962; Li et al., 2006] и отражает роль климатических условий: чем меньше изменчивость суточных величин потенциальной транспирации  $TR^0 / TR_{\max}^0$  за вегетационный период, что характерно для южных регионов с устойчиво теплым климатом, тем лучше критерий (6), характеризующий критическое состояние почвы, соответствует большей критической влажности почвы. Это соответствует экспериментальным данным, согласно которым в теплом климате растения более чувствительны к изменению влажности почвы, чем в северных районах. Согласно (6),  $h_2^{\max}$  соответствует наименьшей влагоемкости почвы  $\omega_{нв}$ .

Критерии, описывающие снижение транспирационной способности растений при высокой влажности почвы, получены экспериментально [Li et al., 2006]:

$$\psi(h_1) < 1, \quad \text{когда} \quad \frac{\omega_{\max} - \omega}{\omega_{\max} - \omega_{нв}} < 0,7$$

и

$$\psi(h_0) = 0, \quad \text{когда} \quad \frac{\omega_{\max} - \omega}{\omega_{\max} - \omega_{нв}} < 0,3, \quad (7)$$

где  $\omega_{\max}$  — полная влагоемкость. Далее по кривым ОГХ находят соответствующие значения  $h_1$  и  $h_0$ .

В табл. 1 для сравнения представлены три варианта расчета параметров модели Феддеса: вариант 1 — упрощенный, в котором все характеристики приняты на уровне средних значений, вариант 2 — по зависимостям (4), (7) и вариант 3 — по уравнениям (6), (7). В расчетах использованы осредненные параметры ОГХ верхнего интервала почвенного разреза (горизонт А) с различным механическим составом для двух «контрастных» типов растительности — травянистой и древесной [Гриневский, 2010]. При этом величины  $\omega_{нв}$  и  $\omega_{вз}$  для почв принимались по кривым ОГХ при значениях высоты всасывающего давления  $h_{нв} = -3,3$  м и  $h_{вз} = -153$  м соответственно. Расчеты проведены для климатических условий Калужской области (метеостанция в г. Мосальск), значения суточной потенциальной транспирации  $TR^0$  получены согласно методике, изложенной в работе [Гриневский, Поздняков, 2010]. При этом величины  $h_2^{\max}$  и  $h_2^{\min}$  в (4) и (6) рассчитаны по среднемноголетним значениям потенциальной транспирации: максимальному — для периода основной фазы развития растительности (при средней температуре воздуха выше 15 °С) и среднему за его пределами.

Как следует из данных табл. 1, значения параметров модели Феддеса, полученные разными спо-

Таблица 1

Расчетные параметры транспирационной модели Феддеса

Тип растительности	Почва	Вариант	Высота всасывающего давления, м				
			$h_3$	$h_2^{\min}$	$h_2^{\max}$	$h_1$	$h_0$
Древесная	Суглинистая	1	-150	-3,3	-3,3	-1	0
		2		-25,6	-11,5	-1,8	-0,7
		3		-20,1	-3,3	-1,8	-0,7
	Супесчаная	1	-150	-3,3	-3,3	-1	0
		2		-24,7	-11,8	-1,9	-0,8
		3		-18,0	-3,3	-1,9	-0,8
	Песчаная	1	-150	-3,3	-3,3	-1	0
		2		-12,3	-7,9	-2,8	-1,8
		3		-9,4	-3,3	-2,8	-1,8
Травянистая	Суглинистая	1	-150	-3,3	-3,3	-1	0
		2		-27,4	-15,1	-1,7	-0,6
		3		-41,5	-3,3	-1,7	-0,6
	Супесчаная	1	-150	-3,3	-3,3	-1	0
		2		-19,8	-12,0	-1,9	-0,9
		3		-28,9	-3,3	-1,9	-0,9
	Песчаная	1	-150	-3,3	-3,3	-1	0
		2		-14,7	-9,7	-2,3	-1,3
		3		-21,8	-3,3	-2,3	-1,3

собами, значительно отличаются, но подчиняются определенным закономерностям.

Во-первых, значения  $|h_2^{\max}|$  и  $|h_2^{\min}|$ , полученные по зависимостям (4) и (6), оказываются больше для травянистой растительности, чем для древесной. Это вполне соответствует экспериментальным данным [Судницын, 1979; Chen et al., 2008], согласно которым для древесных пород уменьшение транспирационной способности происходит в большем диапазоне влажности, чем у травянистой растительности. Это отражает, что они лучше переносят аномальные (сухие или влажные) периоды.

Во-вторых, при более легком механическом составе почвы значения  $|h_2^{\max}|$  и  $|h_2^{\min}|$  уменьшаются, что также согласуется с экспериментальными данными [Судницын, 1979], а величины  $|h_1|$  и  $|h_0|$ , наоборот, увеличиваются. Последнее означает, что в песчаной почве дефицит кислорода для растений может возникнуть при большем всасывающем давлении почвенной влаги и соответственно меньшей влажности за счет более полного заполнения относительно крупных пор.

**Модель Ван Генухтена** [van Genuchten, 1987] описывает изменчивость транспирационной способности растений  $\psi(h)$  в следующем виде:

$$\psi(h) = \frac{1}{1 + (h/h_{50})^\tau}, \quad (8)$$

где  $h_{50}$  — высота давления, при котором интенсивность транспирации падает вдвое по сравнению с потенциальной величиной;  $\tau$  — эмпирический параметр (рекомендуемое значение равно 3 [van Genuchten, Gupta, 1993]).

Как следует из (8), изменчивость транспирационной способности в этой модели характеризуется лишь двумя параметрами, что является несомненным преимуществом по сравнению с моделью Феддеса, однако и в этом случае их определение неоднозначно.

Возможно несколько подходов к их обоснованию. В первом, упрощенном варианте, принято, что снижение транспирационной способности при уменьшении влажности почвы происходит по линейному закону. Тогда ее двукратное сокращение произойдет при средней влажности в интервале от  $\omega_{\text{нв}}$  до  $\omega_{\text{вз}}$ , а соответствующая ей высота давления  $h_{50}$  может быть найдена по кривой ОГХ для определенного типа почвы.

Второй принцип расчета величины  $h_{50}$  основан на отмеченной по экспериментальным данным линейной форме сокращения относительной транспирации при логарифмической шкале всасывающего давления [Судницын, 1979], тогда значение  $h_{50}$  рассчитывается по соответствующей кривой ОГХ для среднелогарифмического значения влажности в интервале от  $\omega_{\text{нв}}$  до  $\omega_{\text{вз}}$ .

И наконец, третий рассматриваемый принцип определения величины  $h_{50}$  основан на зависимости (6) [Li et al., 2006], отражающей тип ОГХ, а также зависимости снижения транспирационной способности растений от климатических условий.

Параметр  $\tau$  в рассматриваемой модели (8) отражает скорость снижения транспирационной способности растений при уменьшении влажности. Как отмечено выше, для древесных пород уменьшение транспирационной способности до нуля происходит в большем диапазоне влажности, что должно соответствовать меньшему углу наклона кривой  $\psi(h)$  и, следовательно, меньшему значению параметра  $\tau$ , чем в случае травянистых растений. Таким образом, в расчетах принимается  $\tau = 2$  для лесного и  $\tau = 4$  для полевого или лугового ландшафтов, что отражает принципиальные различия экспериментальных кривых  $\psi(h)$  для древесной и травянистой растительности [Судницын, 1979; Chen et al., 2008].

Сравнение расчетных параметров транспирационной модели Ван Генухтена  $h_{50}$  и  $\tau$ , полученных, согласно трем рассмотренным способам, для тех же метеоусловий, типов почв и растительности, что и для модели Феддеса, представлено в табл. 2. При этом величины  $TR^0/TR_{\text{max}}^0$  рассчитаны по среднему и максимальному среднегодовым значениям за период основной фазы развития растительности.

Как видно из данных табл. 2, в среднем значения  $|h_{50}|$  для травянистой растительности оказываются больше, а расчетные кривые  $\psi(h)$  круче (рис. 2). Расчетные значения  $|h_{50}|$  уменьшаются и при облегчении механического состава почвы — от суглинистого к песчаному, что согласуется с полученными различиями параметров модели Феддеса и экспериментальными данными [Судницын, 1979]. В разных вариантах расчета значения параметра  $h_{50}$  по модели

Таблица 2

Расчетные параметры транспирационной модели Ван Генухтена

Тип растительности	Почва	Параметры модели транспирации Ван Генухтена			
		$h_{50}$ (м) по способу			$\tau$
		1	2	3	
Древесная	Суглинистая	-12,5	-20,2	-37,3	2
	Супесчаная	-11,2	-19,5	-33,3	
	Песчаная	-6,8	-12,3	-15,0	
Травянистая	Суглинистая	-13,3	-19,8	-45,5	4
	Супесчаная	-9,4	-16,2	-31,9	
	Песчаная	-8,0	-14,6	-24,0	

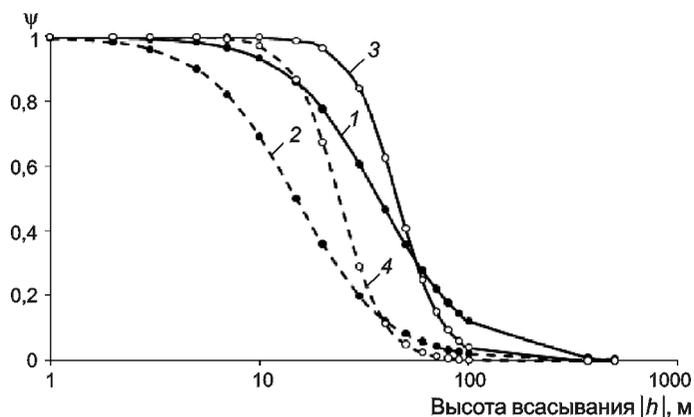


Рис. 2. Расчетные кривые транспирационной способности  $\psi(h)$  согласно модели Ван Генухтена (3-й вариант) для древесной (1, 2) и травянистой (3, 4) растительности при разном механическом составе почвы (1, 3 — суглинки, 2, 4 — пески)

Ван Генухтена, как и по модели Феддеса, сильно отличаются, что требует оценки значимости их вариации.

Анализ двух транспирационных моделей показывает, что они в целом отражают закономерности протекания природного процесса и соответствуют экспериментальным данным. Следует подчеркнуть, что в обеих рассмотренных моделях в большей или меньшей степени использованы два характерных состояния влажностного режима почвы — на уровне наименьшей влагоемкости и влажности завядания. В нашем анализе для различных по механическому составу почв и двух типов растительности они получены по обобщенным кривым ОГХ [Гриневский, 2010] при значениях высоты всасывающего давления  $-3,3$  и  $-153$  м соответственно. Оценка их адекватности экспериментальным данным проведена путем сопоставления с типовыми значениями для почв разного механического состава [Роде, 1965], на рис. 3 видно хорошее соответствие для почвенных горизонтов В и С, а для горизонта А — только для величины влажности завядания. Расчетные значения

наименьшей влагоемкости почвенного горизонта А несколько завышены, особенно для условий с лесным ландшафтом на поверхности. Это объясняется более рыхлым сложением почв верхнего горизонта А и соответственно их меньшим объемным весом по сравнению с характерными для данного литологического (механического) состава значениями [Гриневский, 2010], что наиболее заметно проявляется при песчаном составе почв.

Проведенный анализ показывает, что две рассмотренные модели по-разному описывают процесс транспирационного поглощения влаги корнями, а их параметры, полученные разными способами, также сильно различаются. Это требует проведения анализа значимости полученной вариации параметров моделей и их влияния на расчетные величины инфильтрационного питания подземных вод.

**Модели корневой системы растений.** Интенсивность поглощения влаги корнями растений пропорциональна плотности (концентрации)  $b'(z)$ , которая, как известно, максимальна в приповерхностном слое почвы и экспоненциально затухает с глубиной [Raats, 1974], что характерно как для травянистой, так и для древесной растительности. Согласно (2), рассматриваемая модель транспирационного отбора влаги предполагает использование одномерной функции распределения корней  $b(z)$  в нормированном виде:

$$b(z) = \frac{b'(z)}{\int_{m_r} b'(z) dz} \quad (9)$$

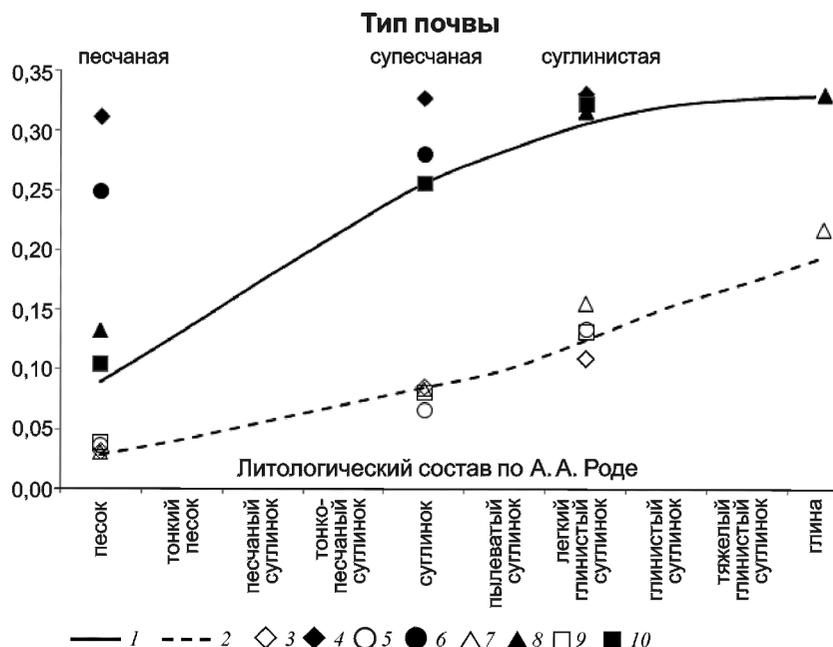


Рис. 3. Сопоставление расчетных значений наименьшей влагоемкости и влажности завядания для рассматриваемых типов механического состава почв при разных ландшафтных условиях на поверхности с характерными значениями: 1, 2 — типовые кривые зависимости наименьшей влагоемкости (1) и влажности завядания (2) от литологии почвы [Роде, 1965]; 3–10 — расчетные значения наименьшей влагоемкости (черные значки) и влажности завядания (белые значки): 3, 4 — горизонт А, лес; 5, 6 — горизонт А, поле; 7, 8 — горизонт В; 9, 10 — горизонт С

При отсутствии экспериментальных данных используют модели распределения корней, характеризующиеся всего одним параметром — глубиной (мощностью) распространения корневой системы ( $m_r$ ), что существенно упрощает их применение, особенно в рамках обобщенных, региональных моделей.

**Модель Гейла–Григала.** Распределение плотности корней по глубине в данной модели описывается степенной функцией [Gale, Grigal, 1987; Li et al., 2006]:

$$b'(z) = \eta^z, \quad \eta = 0,01^{1/m_r}. \quad (10)$$

**Модель Хофмана–Ван Генухтена.** В этой модели функция  $b'(z)$  описывается следующим образом [Hoffman, van Genuchten, 1983]:

$$b'(z) = \begin{cases} \frac{1,66667}{m_r} & \text{при } z < 0,2m_r, \\ \frac{2,0833}{m_r} \left(1 - \frac{z}{m_r}\right) & \text{при } 0,2m_r < z < m_r, \\ 0 & \text{при } z > m_r. \end{cases} \quad (11)$$

Модели (10) и (11) по-разному описывают уменьшение концентрации корней с глубиной: согласно модели Хофмана–Ван Генухтена, в самом приповерхностном слое почвы их плотность примерно одинакова, что характерно для мочковатой корневой системы, а модель Гейла–Григала лучше описывает стержневую и поверхностный типы корней (рис. 4).

Глубина распространения корней растений (мощность корневой зоны) зависит от многих факторов — вида растительности, типа и увлажненности почвы, метеоклиматических условий, глубины залегания УГВ — и может быть весьма различной. По результатам анализа опубликованных данных сделаны следующие обобщения для обоснования средних параметров, использованных при моделировании:

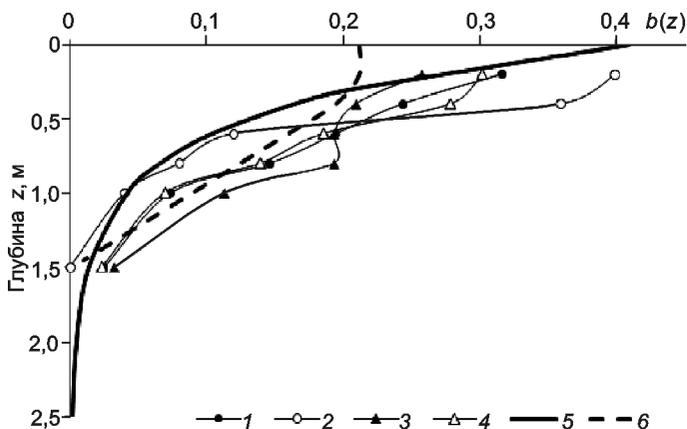


Рис. 4. Графики распределения относительной концентрации корней по глубине: 1–4 для насаждений сосны [Судницын, 1979]: 1, 2 — 10-летних; 3, 4 — 60-летних (1, 3 — на бугре; 2, 4 — в котловине); 5 — по модели Гейла–Григала; 6 — по модели Хофмана–Ван Генухтена

1) у травянистой растительности, как естественной, так и культурной, 80–95% корней расположено в поверхностном слое глубиной до 0,15–0,25 м. Глубина корневой системы древесных пород в среднем значительно больше, чем у травянистых растений (за исключением глубоко укореняющихся бобовых видов), но, как правило, не превышает 2 м [Андреев, 1989; Лесная энциклопедия, 1985];

2) глубина проникновения в почву корневых систем увеличивается от влажных северных к засушливым южным районам: основная масса корней древесных пород сосредоточена в таежных лесах на глубине не более 0,7 м, а в лесостепной зоне до 1,5–2,5 м [Лесная энциклопедия, 1985]. В среднем в диапазон 1–3 м попадает глубина корневой зоны большинства древесных пород при нормальных условиях их произрастания [Pyatt et al., 2001];

3) на песчаных, хорошо дренированных почвах развивается наиболее глубокая корневая система, а на тяжелых, суглинистых, и избыточно увлажненных — приповерхностная. Так, сосна на супесчаных и легкосуглинистых почвах образует стержневую корневую систему, а на тяжелосуглинистых и болотных — поверхностную [Лесная энциклопедия, 1985]. Лучшее развитие корней наблюдается при большом, но не избыточном количестве влаги в почве, таким образом, основная масса корней находится выше УГВ [Судницын, 1979];

4) у большинства многолетних злаковых трав и разнотравья основная масса корней образует густое, относительно равномерное сплетение в верхних слоях почвы до глубины 0,2 м. Корни бобовых и культурных злаковых растений также образуют преимущественно мочковатую систему, но проникают на большую глубину — основная масса до глубины 0,4–0,5 м, а отдельные корни до 1 м [Андреев, 1989]. Таким образом, для травянистой луговой растительности (тип ландшафта «луг») и культурных злаковых и бобовых растений (тип ландшафта «пашня») лучше подходит модель корневой системы Хофмана–Ван Генухтена (рис. 4);

5) большинство древесных пород имеет либо стержневую (дуб), либо поверхностную (ель), либо универсальную (сосна) корневую систему. Исключение составляют виды с мочковатой корневой системой (береза, липа). Таким образом, распространение корней древесных пород в среднем лучше описывается моделью Гейла–Григала (рис. 4).

Сводка осредненных параметров корневых систем в зависимости от типа растительности и механического состава почвы представлена в табл. 3.

**Сопоставление моделей транспирационного отбора влаги и анализ их чувствительности к исходным параметрам.** Сопоставление рассмотренных моделей поглощения влаги корнями растений и оценка их чувствительности к возможной погрешности (неопределенности) оценки исходных параметров проведены на основе моделирования среднего-

Таблица 3

Расчетные модели и параметры корневых систем

Почва	Тип растительности / ландшафт					
	древесная/лес		злаковые/пашня		разнотравье/луг (поле)	
	Расчетная модель	$m_r$ , м	Расчетная модель	$m_r$ , м	Расчетная модель	$m_r$ , м
Песчаная	Модель Гейла–Григала	2,0	Модель Хофмана–Ван Генухтена	1,0	Модель Хофмана–Ван Генухтена	0,5
Супесчаная		1,5		0,75		0,4
Суглинистая		1,0		0,5		0,3

летнего водного баланса в зоне аэрации с помощью программы HYDRUS-1D [Šimůnek et al., 2009]. Для расчетов использованы 100-летние суточные ряды значений потенциальной величины испарения и транспирации, а также интенсивности поступления влаги на поверхность почвы (впитывание) с учетом снегонакопления и снеготаяния, полученные для разных ландшафтных и почвенных условий по методике, рассмотренной в работе [Гринеvский, Поздняков, 2010] для метеоусловий Калужской области (метеостанция в г. Мосальск).

Результаты моделирования, проведенного для условий относительно глубокого (>5 м) залегания УГВ, показывают, что в зависимости от ландшафтных и почвенных условий среднемноголетний водный баланс зоны аэрации формируется как за счет суммарного годового количества влаги, поступившего на поверхность почвы, так и за счет процессов в самой зоне аэрации (табл. 4). Основные закономерности формирования составляющих среднемноголетнего водного баланса зоны аэрации подробно рассмотрены

в работе [Гринеvский, Новоселова, 2010] и заключаются в следующем.

Годовая сумма влаги, поступающей на поверхность почвы (впитывание), увеличивается по мере облегчения механического состава почвы, т.е. от суглинистых к песчаным, причем значительно больше в лесном ландшафте, чем при развитии с поверхности травянистой растительности (полевой тип ландшафта) (табл. 4), главным образом за счет процессов весеннего снеготаяния и стокообразования. Характер растительности также определяет принципиально различные соотношения составляющих суммарной годовой эвапотранспирации — в условиях лесного ландшафта превалирует транспирационный отбор влаги корнями растений, а в поле — физическое испарение из почвы (табл. 4) [Гринеvский, Новоселова, 2010]. Основная причина такого различия транспирации при идентичных метеорологических условиях на поверхности при сопоставимых величинах общей биомассы растений связана со способностью древесных пород извлекать воду с большей глубины, а

Таблица 4

Результаты моделирования среднемноголетнего годового баланса влаги в зоне аэрации при различных вариантах расчета транспирационного отбора корнями растений

Тип растительности	Почва	Впитываемая влага, мм	Модель Фелдеса				Модель Ван Генухтена					
			вариант	транспирация, мм	испарение, мм	инфильтрация, мм	невязка баланса, мм	вариант	транспирация, мм	испарение, мм	инфильтрация, мм	невязка баланса, мм
Древесная	Суглинистая	484	1	375	65	45	-1	1	324	65	96	-1
			2	377	65	43	-1	2	346	65	74	-1
			3	374	65	46	-1	3	365	65	54	0
	Супесчаная	533	1	401	64	68	0	1	347	64	122	0
			2	402	64	68	-1	2	374	64	95	0
			3	398	64	72	-1	3	391	64	78	0
	Песчаная	566	1	404	64	99	-1	1	302	65	199	0
			2	393	64	110	-1	2	352	64	150	0
			3	390	64	113	-1	3	364	64	138	0
Травянистая	Суглинистая	411	1	143	246	23	-1	1	108	265	39	-1
			2	148	244	20	-1	2	121	259	32	-1
			3	146	244	21	0	3	140	248	23	0
	Супесчаная	473	1	155	291	27	0	1	97	327	50	-1
			2	160	288	26	-1	2	122	314	37	0
			3	159	289	26	-1	3	145	299	30	-1
	Песчаная	530	1	157	302	71	0	1	90	337	104	-1
			2	162	300	69	-1	2	118	328	85	-1
			3	160	300	71	-1	3	139	316	76	-1

следовательно, и из большего объема почвы за счет более развитой корневой системы, что подтверждается экспериментальными данными [Chen et al., 2008]. При этом роль механического состава почвы в формировании транспирационного отбора влаги корнями растений существенно меньше (табл. 4). Основные различия составляющих годового баланса влаги в зоне аэрации формируют и значительную разницу ее поступления на УГВ, т.е. инфильтрационное питание подземных вод, которое изменяется от 20 до 140 мм/год. Наиболее благоприятные условия для его формирования характерны для лесного ландшафта при песчаном составе почвы, а наихудшие — при развитии с поверхности травянистой растительности на суглинистых почвах [Гриневский, Новоселова, 2010] (табл. 4).

Сопоставление рассмотренных моделей транспирационного отбора влаги корнями растений проведено по среднегодовым величинам годовой

суммы инфильтрационного питания подземных вод, поскольку изменение величины транспирации — в зависимости от используемой модели транспирационного поглощения и ее параметров — практически напрямую влияет и на расчетное значение инфильтрации. Результаты сравнения двух транспирационных моделей при разных вариантах обоснования их параметров (табл. 4) позволяют сделать следующие основные выводы.

Во-первых, расчетная модель Феддеса при всех вариантах ее параметров дает практически одинаковые результаты: различия в итоговых величинах инфильтрации в большинстве случаев составляют 1–2 мм/год и незначительны. Исключение составляет лишь первый, упрощенный вариант задания параметров модели — для условий развития с поверхности древесной растительности на песчаных почвах, где отличие в расчетных значениях транспирации и инфильтрации составляет 11–14 мм/год (табл. 4). Од-

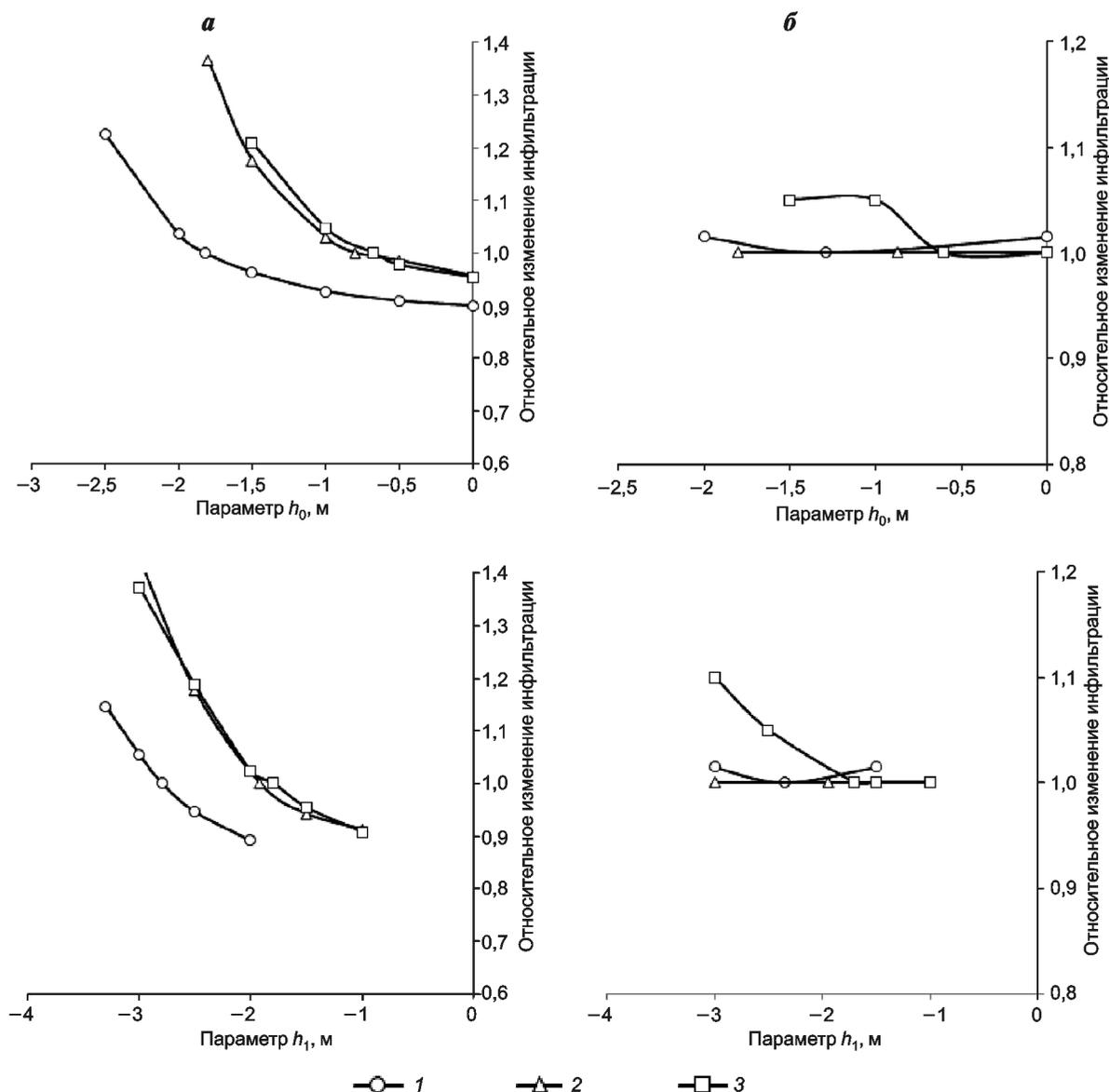


Рис. 5. Чувствительность оценки инфильтрации к изменению параметров  $h_0$  и  $h_1$  модели Феддеса для древесной (а) и травянистой (б) растительности при различном составе почвы: 1 — песок, 2 — супесь, 3 — суглинок

нако и в этом случае относительная разница величин инфильтрации не превышает 10%. Использование модели Ван Генухтена в зависимости от способов расчета ее параметров дает расхождение итоговых величин инфильтрационного питания подземных вод от 20 до 60 мм/год (до 50%). При этом в третьем варианте обоснования ее параметров (согласно (6) [Li et al., 2006]) модель Ван Генухтена дает результаты, хорошо сопоставимые с моделью Феддеса: расхождение в расчетных величинах годовой суммы инфильтрации всего 2–8 мм/год. Исключение опять же составляют условия древесной растительности на песчаных почвах, где различие годовой инфильтрации составляет, согласно двум моделям, 25 мм (~20%). Отсюда следует, что упрощенные подходы к расчету параметров модели Ван Генухтена (первый и второй варианты) непригодны для практического использования.

Во-вторых, практическая идентичность результатов, полученных во всех трех вариантах использования модели Феддеса (табл. 4), показывает, что эта модель нечувствительна к параметрам  $h_2^{\min}$  и  $h_2^{\max}$ , которые в зависимости от способа их обоснования отличаются в несколько раз, а иногда и больше чем на порядок (табл. 1). Модель Ван Генухтена, несмотря на гораздо меньшие вариации параметра  $h_{50}$  в разных вариантах (табл. 2), оказывается чувствительна к его значению (табл. 4).

Чувствительность модели Феддеса к остальным ее параметрам ( $h_0, h_1, h_3$ ) оценивалась по результатам дополнительных вариантов расчета, в которых диапазон относительной вариации параметров достигал  $\pm 300\%$  и ограничивался в соответствии с их физическим смыслом ( $0 \geq h_0 > h_1 > h_{\text{НВ}}$ ) и экспериментальными данными ( $-500 \text{ м} \leq h_3 \leq -50 \text{ м}$  [Судницин, 1979]). Анализ результатов показывает, что модель Феддеса чувствительна к параметрам  $h_0, h_1$ , характеризующим процесс сокращения транспирационного отбора влаги из почвы при высокой влажности за счет дефицита кислорода, только для древесной растительности, —

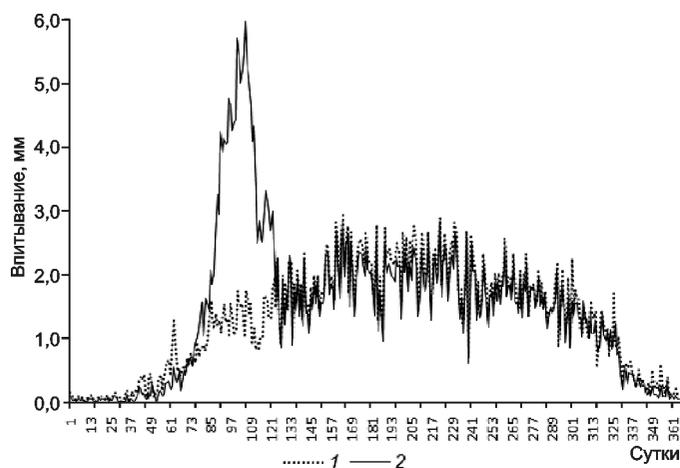


Рис. 6. Среднемноголетняя внутригодовая изменчивость впитывания влаги в супесчаную почву в условиях полевого (1) и лесного (2) ландшафта

в этом случае относительная разница в расчетных величинах инфильтрации для супесчаных и суглинистых почв может достигать 40%, а для песчаных ~20% (рис. 5). При этом наиболее сильно на результат влияет завышение абсолютных величин параметров  $|h_0|, |h_1|$ , в то время как их занижение приводит к относительной ошибке оценки инфильтрации не более 10%.

В случае травянистой растительности модель Феддеса оказывается практически нечувствительна к параметрам  $h_0, h_1$ , это может означать, что анаэробные условия в почве в условиях полевого ландшафта практически не формируются при любом ее механическом составе. Подтверждением этому служат графики внутригодовой динамики впитывания влаги в почву и ее транспирации для лесного и полевого ландшафтов (рис. 6). Они показывают, что основное различие в характере поступления влаги в почву происходит в период весеннего снеготаяния [Гриневский, Новоселова, 2010], когда за счет более медленного таяния снега в лесу и более затрудненного ее поверхностного стекания в условиях лесного ландшафта наблюдается мощный импульс поступления влаги в почву, что приводит к резкому увеличению ее влажности и формированию анаэробных условий, сокращающих транспирационный отбор влаги частью корней. При этом параметры  $h_0$  и  $h_1$  существенно влияют на изменение транспирации именно в весенний период, что видно на рис. 7. В условиях полевого ландшафта с травянистой растительностью такого мощного импульса поступления влаги в почву, приводящего к образованию в ней дефицита кислорода, не происходит за счет быстрого таяния снега и отвода влаги поверхностным стоком, поэтому параметры  $h_0$  и  $h_1$  не влияют на расчетные величины транспирации.

Результаты оценки чувствительности расчетной модели Феддеса к параметру  $h_3$ , контролирующему интенсивность снижения транспирационного поглощения влаги при низкой влажности и его полное прекращение, показывают, что максимальная раз-

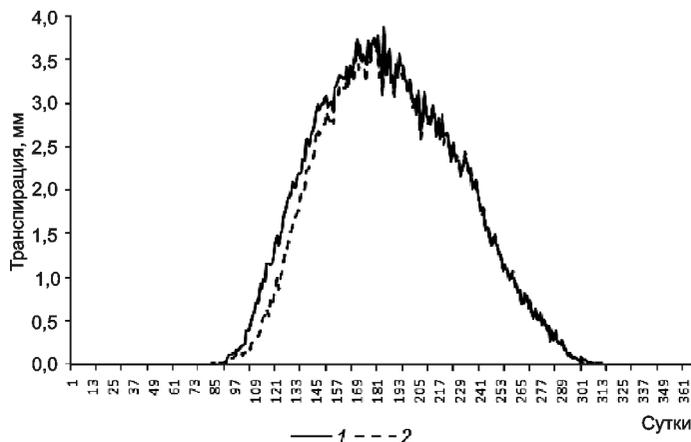


Рис. 7. Расчетная внутригодовая изменчивость транспирации древесной растительностью (лесной тип ландшафта) при различных значениях параметра  $h_0$  в модели Феддеса: 1 —  $-0,8 \text{ м}$ ; 2 —  $-1,8 \text{ м}$

ница в оценке годовой инфильтрации составляет для древесной растительности  $\pm 10$  мм, а для травянистой  $\pm 5$  мм. В относительном виде она оказывается значимой только при суглинистом составе почвы (где инфильтрация минимальна) и может составлять до  $\pm 20\%$  в условиях лесного и до  $\pm 30\%$  в условиях полевого ландшафтов (рис. 8). Таким образом, использование в модели Феддеса среднего значения параметра  $h_3$ , равного  $-153$  м, в большинстве случаев не приводит к существенным погрешностям оценки инфильтрационного питания подземных вод.

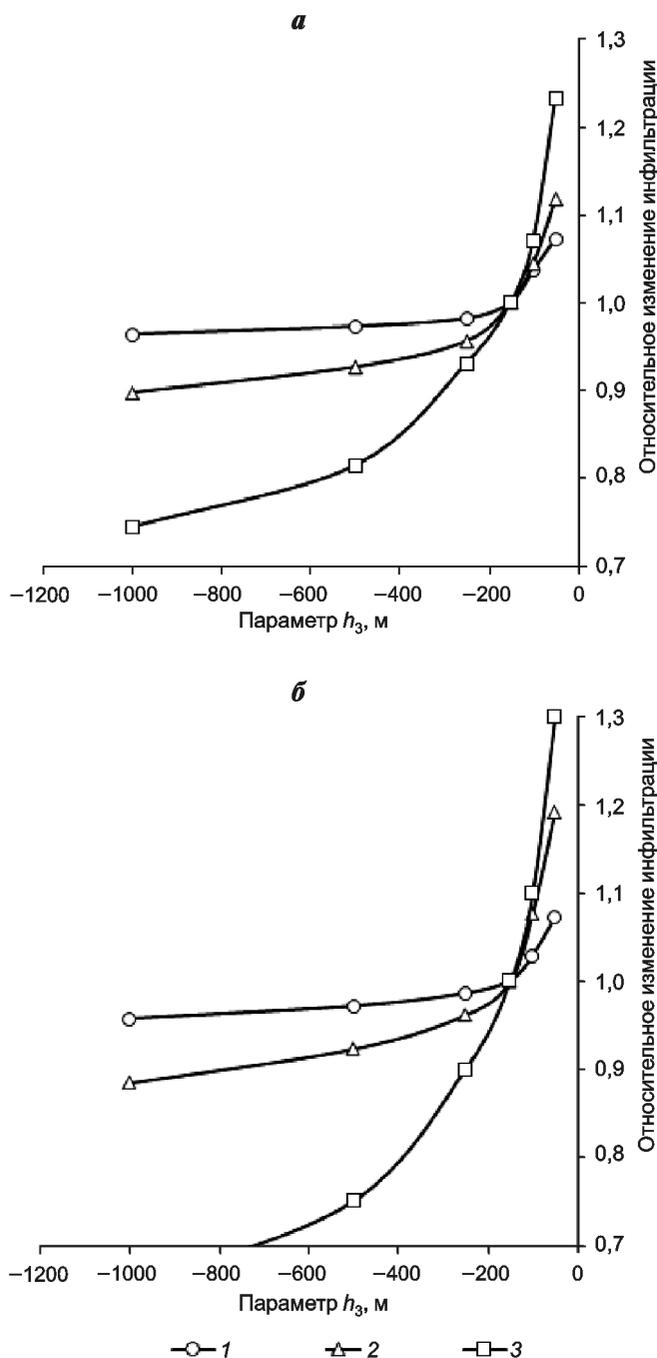


Рис. 8. Чувствительность оценки инфильтрации к изменению параметра  $h_3$  модели Феддеса для древесной (а) и травянистой (б) растительности при различном составе почвы: 1 — песок; 2 — супесь; 3 — суглинок

В альтернативной расчетной модели транспирационного отбора влаги Ван Генухтена (8) посредством различной скорости асимптотического приближения расчетной функции  $\psi(h)$  к нулю отражена зависимость нижнего предела доступной почвенной влаги от механического состава почвы и типа растительности (рис. 2).

Чувствительность транспирационных моделей к параметрам корневой системы растений оценивали для двух расчетных функций уменьшения концентрации корней с глубиной — Гейла-Григала и Хоффмана-Ван Генухтена, соответствующих лесному и полево-луговому ландшафтам (табл. 3). Результаты моделирования показали, что мощность корневой зоны растений ( $m_r$ ) существенно влияет на расчетные значения годовой транспирации влаги и инфильтрационного питания подземных вод (табл. 5), причем изменения составляющих годового водного баланса зоны аэрации примерно одинаковы для транспирационных моделей Феддеса и Ван Генухтена. Максимальные различия расчетных величин инфильтрации за счет параметра  $m_r$  независимо от использованной модели корневой системы возникают при небольшой глубине распространения корней и на суглинистых почвах. Для песчаных почв, где мощность корневой зоны существенно больше, погрешность ее задания несущественно сказывается на расчетных величинах инфильтрационного питания подземных вод (разница составляет 6–7%) (табл. 5).

Таблица 5

Расчетные значения составляющих годового водного баланса зоны аэрации и относительное изменение инфильтрации ( $W_{\text{отн}}$ ) при разной мощности корневой зоны растений ( $m_r$ ) на примере транспирационной модели Ван Генухтена

Тип растительности, модель корневой зоны	Почва	$m_r$ , м	Транспирация, мм	Испарение, мм	Инфильтрация, мм	$W_{\text{отн}}$ , %
Древесная, Гейла-Григала	Суглинистая	0,5	345	65	74	+37
		1,0	365	65	54	0
		1,5	381	65	38	-30
	Супесчаная	1,0	378	64	91	+17
		1,5	391	64	78	0
		2,0	401	64	68	-13
	Песчаная	1,5	355	64	147	+7
		2,0	364	64	138	0
		2,5	372	64	130	-6
Травянистая, Хоффмана-Ван Генухтена	Суглинистая	0,2	127	246	39	+70
		0,3	140	248	23	0
		0,5	153	253	6	-74
	Супесчаная	0,2	134	303	38	+27
		0,4	145	299	30	0
		0,6	152	300	23	-23
	Песчаная	0,3	130	320	81	+7
		0,5	139	316	76	0
		0,7	144	317	71	-7

Использование в расчетах «неоптимальной» модели для корневой зоны (например, модели Гейла–Григала для травянистой растительности) также приводит к максимальным различиям в величине инфильтрации при суглинистом составе почвы (двукратное увеличение расчетной величины годовой инфильтрации на 20 мм). Для песчаных почв в этом случае погрешность оценки инфильтрации несущественна (~5%).

**Заключение.** Проведенные исследования показали возможность рассчитывать транспирационный отбор влаги корнями растений с использованием обобщенных параметров при моделировании влагопереноса в зоне аэрации. Рассмотренные подходы к выбору и обоснованию параметров транспирационных моделей, основанные на адекватном отражении основных закономерностей процесса поглощения влаги корнями растений в типовых ландшафтных и почвенных условиях, позволяют минимизировать погрешность оценки инфильтрационного питания подземных вод.

Модель Феддеса наиболее полно описывает изменчивость транспирационной способности растений в зависимости от давления почвенной влаги за счет учета анаэробных условий при высокой влажности. Однако такие условия, приводящие к отмиранию части корней и снижению транспирации, реально возникают лишь при устойчивом длительном положении УГВ близко к поверхности земли. При этом модель характеризуется большим числом параметров, к которым чувствительны результаты оценки инфильтрации, что требует их определения по экспериментальным данным.

Практическое использование расчетной модели транспирационного отбора влаги Ван Генухтена значительно проще: параметр  $h_{50}$  следует определять по кривым ОГХ согласно (6) и принимать  $\tau = 2$  для древесной и  $\tau = 4$  для травянистой растительности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреев Н.Г. Луговое и полевое кормопроизводство. М.: Агропромиздат, 1989. 539 с.
- Будаговский А.И. Испарение почвенных вод // Физика почвенных вод. М.: Наука, 1981. С. 13–95.
- Гриневский С.О. Схематизация строения и параметров зоны аэрации для моделирования инфильтрационного питания подземных вод // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2010. № 6. С. 56–67.
- Гриневский С.О., Новоселова М.В. Закономерности формирования инфильтрационного питания подземных вод // Вод. ресурсы. 2011. Т. 38, № 2. С. 169–180.
- Гриневский С.О., Поздняков С.П. Принципы региональной оценки инфильтрационного питания подземных вод на основе геогидрологических моделей // Там же. 2010. Т. 37, № 5. С. 543–557.
- Лесная энциклопедия / Гл. ред. Г.И. Воробьев. М.: Сов. энциклопедия, 1985. 563 с.
- Пашковский И.С. Разработка геофильтрационных моделей системы «зона аэрации–грунтовые воды» и их

В этом случае результаты оценки годового водного баланса зоны аэрации для относительно глубокого залегания УГВ (>5 м) вполне сопоставимы с расчетами по модели Феддеса. Таким образом, при отсутствии экспериментальных данных, характеризующих снижение транспирационной способности растений в зависимости от влажности почвы, следует рекомендовать использование модели Ван Генухтена и лишь при высоком среднегодовом положении УГВ — модели Феддеса.

Результаты оценки инфильтрационного питания подземных вод на основе двух рассмотренных моделей транспирационного отбора влаги корнями растений наиболее чувствительны к параметрам функции распределения плотности корней по глубине. Для травянистой луговой (многолетние травы) и культурной злаковой растительности в качестве расчетной следует рекомендовать модель корневой системы Хоффмана–Ван Генухтена (11), а для древесной — модель Гейла–Григала (10).

В целом погрешности оценки инфильтрационного питания подземных вод, связанные с моделированием транспирационного отбора влаги корнями растений, снижаются при облегчении механического состава почвы от суглинистого к песчаному как в абсолютных, так и в относительных величинах. Максимальные относительные ошибки в расчетных величинах годовой инфильтрации в этом случае могут возникать при суглинистом составе почвы.

Выводы о практической целесообразности использования моделей транспирационного отбора влаги корнями растений для обобщенных оценок инфильтрационного питания подземных вод получены на основе использования метеоданных, характеризующих типичные климатические условия центра европейской части России. Их правомерность при других климатических условиях требует дополнительного обоснования.

применение при изучении взаимосвязи подземных и поверхностных вод: Автореф. докт. дисс. М.: МГУ, 1985.

Роде А.А. Основы учения о почвенной влаге. Т. 1. Водные свойства почв и передвижение почвенной влаги. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 663 с.

Судницын И.И. Движение почвенной влаги и водопотребление растений. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 255 с.

Chen X., Rubin Y., Ma S., Baldocchi D. Observations and stochastic modeling of soil moisture control on evapotranspiration in a Californian oak savanna // Water Res. Res. 2008. Vol. 44. P. 1–13 (W08409, doi:10.1029/2007WR006646).

Denmead O.T., Shaw R.H. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions // Agron. J. 1962. Vol. 54. P. 385–390.

Feddes R.A., Bresler E., Neuman S.P. Field test of a modified numerical model for water uptake by root systems // Water Res. Res. 1974. Vol. 10, N 6. P. 1199–1206.

Gale M.R., Grigal D.F. Vertical root distributions of northern tree species in relation to successional status // Can. J. For. Res. 1987. Vol. 17. P. 829–834.

*Genuchten M.Th. van.* A numerical model for water and solute movement in and below the root zone // Res. Rep. N 121. U.S. Salinity laboratory, USDA, ARS. California, Riverside. 1987. Vol. 221.

*Genuchten M.Th. van, Gupta S.K.* A reassessment of the crop tolerance response function // Indian Soc. Soil Sci. 1993. N 4. P. 730–737.

*Hoffman G.J., Genuchten M.Th. van.* Soil properties and efficient water use: Water management for salinity control // Limitations and efficient water use in crop production. Madison: Am. Soc. Agron. 1983. WI. P. 73–85.

*Li K.Y., De Jong R., Coe T.R., Ramankutty N.* Root-water uptake based upon a new water stress reduction and an asymptotic root distribution function // Earth Interactions. 2006. Vol. 10, N 14. P. 1–22.

*Novak V., Havrila J.* Transpiration of plants: A review of calculation methods // Geophys. Res. Abstr. 2005. Vol. 7. P. 1–5.

*Novak V., Havrila J.* Method to estimate the critical soil water content of limited availability for plants // Biologia Brat-

islava. Sect. Botany. 2006. Suppl. 61. 19. P. 289–293 (Doi: 10.2478/s11756-006-0175-9).

*Pyatt G., Ray D., Fletcher J.* An ecological classification for forestry in Great Britain // Forestry Commission Bull. 124. Forestry Commission. Edinburgh, 2001. P. 1–8.

*Raats P.A.C.* Steady flows of water and salt in uniform soil profiles with plant roots // Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 1974. N 38. P. 717–722.

*Schaap M.G., Leij F.L., Genuchten M.Th. van.* Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions // J. of Hydrology. 2001. Vol. 251. P. 163–176.

*Šimůnek J., Šejna M., Saito H.* et al. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Ver. 4.08 // Prepr. Depart. of Environ. Sci. University of California Riverside. California, Riverside. 2009. 296 p.

Поступила в редакцию  
26.10.2010