

УДК 556.332.629

**Е.А. Дедюлина<sup>1</sup>, П.Ю. Василевский<sup>2</sup>, С.П. Поздняков<sup>3</sup>****ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ РАСЧЕТОВ ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО ПИТАНИЯ К ПАРАМЕТРУ СВЯЗНОСТИ ПОР ПОРОД ЗОНЫ АЭРАЦИИ***ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,  
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1**Lomonosov Moscow State University, 119991, GSP-1, Leninskiye Gory, 1*

Знание величины инфильтрационного питания — необходимое условие при решении разного класса гидрогеологических задач. Один из методов расчета инфильтрационного питания — метод моделирования влагопереноса в зоне аэрации. При расчетах инфильтрационного питания используются параметры влагопереноса, в частности, параметр связности пор  $l$ . Чувствительность расчетного питания к значению параметра  $l$ , особенно в условиях гумидного климата, изучена недостаточно. Для расчета инфильтрационного питания методом моделирования влагопереноса нами использованы данные экспериментального определения параметров влагопереноса для образцов с двух площадок с разными ландшафтными условиями и строением зоны аэрации: лесной на песках и полевой на суглинках. Кроме того, выполнен расчет для значения  $l=0,5$  и для параметра  $l$  для этого типа отложений по литературным данным. Анализ результатов расчета показал, что использование фиксированной величины  $l=0,5$  ведет к значительному завышению расчетного питания как для лесного, так и для полевого ландшафта, что подчеркивает важность экспериментального определения параметров влагопереноса при расчетах инфильтрационного питания. Анализ компонентов водного баланса показал, что увеличение расчетного питания с увеличением значения параметра  $l$  связано в основном с уменьшением испарения из верхнего слоя почвы.

**Ключевые слова:** инфильтрационное питание, зона аэрации, моделирование влагопереноса, параметр связности пор, водный баланс.

Information on recharge value is necessary for solving different classes of hydrogeological problems. One of the methods of recharge estimation is simulation of flow in vadose zone. Soil hydraulic parameters are used to estimate recharge by flow in vadose zone. One of the hydraulic parameters is the pore connectivity parameter  $l$ . The sensitivity of estimated recharge to the value of pore connectivity parameter, especially under humid climate conditions, is studied insufficiently. In present study, the experimental values of soil hydraulic parameters of samples from two different sites with various landscape conditions and vadose zone structure (forest landscape on sand and field landscape on loam) were used to estimate recharge. Recharge estimation was also carried for the value of  $l=0,5$  and for reported values of  $l$  parameter for certain type of sediment. Analysis of calculation results demonstrated that using fixed value of  $l=0,5$  leads to significant overestimation of calculated recharge both for forest and field landscapes, which emphasizes the importance of experimental definitions of soil hydraulic parameters for recharge estimation. The analysis of the water balance components showed that the increase of estimated recharge with enhancement of  $l$  value is mainly associated with the decrease of evaporation from the upper soil layer.

**Key words:** groundwater recharge, vadose zone, simulation of unsaturated flow, pore connectivity parameter, water balance.

**Введение.** Инфильтрационное питание — основной источник формирования естественных ресурсов подземных вод в гумидной зоне. Кроме того, интенсивностью инфильтрационного питания определяется скорость миграции загрязнения с поверхности земли до уровня грунтовых вод. Знание величины инфильтрационного питания — необходимое условие для решения как ресурсных, так и экологических задач гидрогеологии методами математического моделирования.

Для определения величины инфильтрационного питания существует множество методов, которые подразделяются на две группы: региональные (площадные) и локальные (точечные). В последнее время один из наиболее используемых — метод моделирования влагопереноса в зоне аэрации. Этот точечный метод позволяет учитывать трансформацию осадков на поверхности земли, а также ненасыщенный влагоперенос в зоне аэрации с учетом эвапотранспирации и отбора влаги корнями

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра гидрогеологии, вед. инженер; e-mail: lazareva\_e\_a@mail.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра гидрогеологии, аспирант; e-mail: valenciacf@mail.ru

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра гидрогеологии, профессор; e-mail: spozd@mail.ru

растений [Гриневский и др., 2010]. При моделировании влагопереноса в зоне аэрации используется ряд параметров, среди которых выделим параметр связности пор  $l$ , который находится в показателе степени величины относительной насыщенности в зависимости Ван Генухтена–Муалема [Muallem, 1976]. Параметр  $l$  обычно получают при подборе параметров влагопереноса к опытным кривым основной гидрофизической характеристики (ОГХ) и функции влагопроводности. Во многих работах, а также по умолчанию при моделировании [Simunek et al., 2013] параметр связности пор принимают равным 0,5. Однако существует ряд публикаций, в которых указано, что значение параметра связности пор может быть отрицательным [Schaap et al., 2000; Seboong et al., 2013; Wang et al., 2009; Wosten et al., 1988; Yoshiki et al., 2001].

Влияние значения параметра  $l$  на величину расчетного инфильтрационного питания исследовано недостаточно, особенно для условий гумидного климата. Цель нашего исследования — определение чувствительности расчетного питания к параметру связности пор. Для достижения поставленной цели последовательно решались следующие задачи: экспериментальное определение параметров влагопереноса пород зоны аэрации лесного и полевого ландшафта на территории Звенигородской биологической станции МГУ имени М.В. Ломоносова; расчет инфильтрационного питания методом моделирования влагопереноса в зоне аэрации с использованием экспериментально полученных параметров и значения параметра  $l$ , равного 0,5, и литературных значений параметра  $l$  для этого типа отложений; сравнение полученных значений инфильтрационного питания и составляющих водного баланса при разных значениях параметра  $l$ .

**Расчетная модель формирования питания и ее параметры.** Модель влагопереноса в зоне аэрации представлена уравнениями одномерной насыщенно-ненасыщенной фильтрации от поверхности земли до уровня грунтовых вод и реализована в программном коде HYDRUS-1D [Simunek et al., 2013], который использовался для моделирования инфильтрационного питания в нашем исследовании:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( k_\theta(S) \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right) - TR_p(z, t, h), \quad (1)$$

$$k_\theta(S) = k \cdot S^l \left[ 1 - \left( 1 - S^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2; \quad l > -\frac{2}{m}, \quad (2)$$

$$S(h) = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \begin{cases} [1 + |\alpha|^n]^{-m}, & \text{при } h < 0, \\ 0, & \text{при } h \geq 0, \end{cases} \quad (3)$$

где  $S(h)$  — насыщенность пор подвижной влагой,  $\theta(h)$  — равновесная объемная влажность (влажность, соответствующая отрицательной высоте давления влаги в ненасыщенной зоне (всасывающему давлению),  $h$ , см);  $\theta_r$  — остаточная объемная влажность;  $\theta_s$  — объемная влажность, близкая к влажности насыщения за вычетом объема, занятого заземленным воздухом (принимается равной пористости);  $\alpha$  — эмпирический параметр, обратный давлению барботирования (входа воздуха), 1/см;  $n$  — эмпирический параметр, зависящий от ранга распределения пор по размерам;  $m = 1 - 1/n$ ;  $l$  — эмпирический параметр связности пор;  $k_\theta$  — коэффициент влагопереноса при объемной влажности  $\theta$ , см/сут;  $k$  — коэффициент фильтрации при полном влагонасыщении, см/сут;  $TR_p$  — транспирация, 1/сут.

Для расчета питания уравнение (1) решается совместно с системно-зависимым граничным условием на поверхности, определяющим баланс поступающей на поверхность земли влаги от выпадающих осадков и снеготаяния с испарением доступной влаги с поверхности почвы. При этом испарение принимается равным потенциальному испарению (испаряемости), если высота всасывания больше равновесной высоты  $h_{krit}$ , и равным нулю, если высота всасывания достигает этой равновесной высоты. Равновесная высота зависит от относительной влажности воздуха  $H_r$ , как показано в [Simunek et al., 2013]:

$$h_{krit} = \frac{RT}{M_g} \ln(H_r), \quad (4)$$

где  $R$  — универсальная газовая постоянная, Дж/моль/град;  $T$  — абсолютная температура приземного воздуха, град;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $M$  — молекулярная масса воды, кг/моль.

Зависимость  $k_\theta$  от  $\theta$  — это зависимость коэффициента влагопереноса от влажности. Зависимость всасывающего давления (капиллярно-сорбционного давления влаги)  $h$  от  $\theta$  называется ОГХ [Шейн, 2005]. Уравнение (3) для описания ОГХ впервые предложено Ван Генухтеном, а уравнение (2) получено на основе использования подхода И. Муалема [Muallem, 1976] для вычисления связи коэффициента влагопереноса по известному коэффициенту фильтрации и известной ОГХ. Поэтому систему уравнений (2–3) называют моделью Ван Генухтена–Муалема.

Наше исследование было сфокусировано на параметре связности пор  $l$ , который ввел И. Муалем [Muallem, 1976] в модели, позволяющей вычислить коэффициент влагопереноса по кривой ОГХ. Он рекомендовал использовать значение  $l=0,5$  в качестве универсального для дисперсных пород. Однако его вывод основан на работе с 45 преимущественно крупнозернистыми образцами пород, причем при среднем значении 0,5, в зависимости

от образца значение параметра  $l$  изменялось от  $-5$  до  $5$ . В действительности, как показывают многочисленные исследования последних десятилетий, значение параметра  $l$  может быть отрицательным, причем наблюдается тенденция к уменьшению  $l$  с увеличением дисперсности породы.

Так, в работе [Wosten et al., 1988] на основе опробования около 200 образцов, сделан вывод, что значение параметра  $l$  может варьировать в более широких пределах: от  $-16$  до  $2$ . Кроме того, в указанной работе отмечено, что фиксация значения параметра  $l$ , равного  $0,5$ , при подборе параметров влагопереноса к результатам опробования дает удовлетворительное схождение модельных и экспериментальных значений объемной влажности при работе с крупнозернистыми образцами и неудовлетворительное схождение при работе с мелко- и среднезернистыми, а тем более с глинистыми образцами.

В работе [Yoshiki et al., 2001] указано, что для 87 образцов дисперсных пород значение параметра  $l$  изменяется от  $3,2$  до  $-5,2$  при среднем значении  $-0,9$ . Также показана зависимость  $k_\theta$  от  $l$  и сделан вывод о том, что использование подобранных значений параметра  $l$  позволяет получить лучшую сходимость с экспериментальными значениями  $k_\theta$  ( $\theta$ ), чем использование фиксированного значения параметра  $l$ , равного  $0,5$ .

В работе [Seboong et al., 2013] по экспериментальным данным подобраны значения параметра  $l$  для 8 дисперсных образцов (от песков до супесей), отобранных на территории Южной Кореи. Значения параметра  $l$  изменялись от  $-3,7$  до  $-1,5$ .

В работе [Wang et al., 2009] описаны результаты подбора параметра  $l$  для 51 песчаного и 19 супесчаных образцов. Среднее значение для песчаных образцов составило  $-0,15$ , а для супесчаных  $-0,68$ . Кроме того, указано, что при использовании отрицательных значений параметра  $l$  по модели Ван Генухтена–Муалема могут возникать физически необъяснимые явления — коэффициент влагопереноса может возрасти по мере уменьшения объемной влажности. Именно поэтому уравнение (2) записано нами здесь с формальным ограничением на связь параметров  $l$  и  $m$ , гарантирующим монотонное убывание значений коэффициента влагопереноса при уменьшении насыщенности пор от единицы до нуля. Использование значения  $l=0,5$  в соответствии с рекомендацией И. Муалема позволяет избежать подобных явлений, однако приводит к худшему совпадению модельных и экспериментальных кривых влагопроводности. Авторы работы [Wang et al., 2009] также исследовали чувствительность инфильтрационного питания к изменению параметров влагопереноса и пришли к выводу, что в аридных условиях на инфильтрационное питание больше всего влияют параметры  $l$  и  $n$ . С их увеличением повышается и величина инфильтрационного питания в ос-

новном из-за уменьшения величины испарения из почвы.

В работе [Schaap et al., 2000] сделан подбор значения параметра  $l$  для 235 образцов дисперсных пород от песков до глин. Среднее значение параметра  $l$  изменялось от  $-1,28$  для песков до  $-6,97$  для суглинков при среднем значении для всех образцов  $-3,09$ . Авторы отмечают, что использование подобранных значений параметра  $l$  значительно уменьшает среднеквадратичную ошибку между модельными и экспериментальными кривыми по сравнению со стандартным значением  $l=0,5$ . Авторы указанной работы также обращают внимание, что отрицательные значения параметра связности пор затрудняют интерпретацию модели Ван Генухтена–Муалема, так как они означают, что с уменьшением объемной влажности связность между порами должна увеличиваться. При отрицательных значениях параметра  $l$  происходит более плавное снижение значений коэффициента влагопереноса, чем при положительных. Эти авторы приходят к выводу, что в действительности параметры  $l$  и  $k$  в уравнении Ван Генухтена–Муалема — всего лишь эмпирические коэффициенты, которые не имеют физической интерпретации, причем другие исследования тоже подтверждают, что подбор этих эмпирических параметров к экспериментальным данным позволяет реалистично предсказывать значения  $k$  по модели Ван Генухтена–Муалема, вполне отвечающие значению коэффициента фильтрации образцов при полном насыщении.

Таким образом, влияние значения параметра  $l$  на величину расчетного инфильтрационного питания исследовано недостаточно, особенно для условий гумидного климата, и изучено нами на примере территории Звенигородской биологической станции (ЗБС) МГУ имени М.В. Ломоносова.

**Краткое описание объекта исследований.** Образцы для исследования отобраны на территории ЗБС в Одинцовском районе Московской области. Климат района умеренно-континентальный, гумидный. Среднегодовая температура воздуха  $+4,8$  °С. Среднегодовая сумма осадков 660 мм. Рельеф территории представляет собой холмистую равнину, расчлененную овражной и речной сетью с абсолютными отметками до  $+200$  м. В гидрогеологическом отношении район исследований принадлежит к центральной части Московского артезианского бассейна. Аллювиальные отложения высокой поймы и первой надпойменной террасы служат водовмещающими для безнапорного грунтового водоносного горизонта. В составе аллювия представлены суглинки, мелкозернистые и крупнозернистые пески, алевроиты, гравий и галька. Для этой местности характерны два вида ландшафтов: лесной (с елово-широколиственной растительностью) и полевой (с луговой разнотравной растительностью). В лесном ландшафте

средняя глубина залегания уровня грунтовых вод составляет 1,7 м, в полевом — 3,5 м.

**Характеристика использованных данных и методики расчета.** Для изучения разрезов и отбора образцов на территории ЗБС пройдено два шурфа: один в лесном ландшафте и один — в полевом. Шурфы расположены на первой надпойменной террасе р. Москва, сложенной современными верхнечетвертичными аллювиальными отложениями мощностью 5–7 м. Шурф в лесном ландшафте пройден до глубины 1,1 м, в полевом ландшафте — до глубины 1,6 м. В лесном шурфе породы зоны аэрации представлены (сверху вниз): песком мелкозернистым, супесью и мелкозернистым песком. В полевом шурфе породы зоны аэрации представлены дерном, супесью, суглинком. Для каждой литологической разности с помощью режущих обойм отобраны образцы пород зоны аэрации (табл. 1).

Таблица 1

Описание шурфов

№ слоя	Глубина, м	Литологическое описание пород	Глубина отбора, м
лесной шурф			
1	0–0,35	песок мелкозернистый	0–0,09
2	0,35–0,80	супесь	0,35–0,44
3	0,80–1,10	песок мелкозернистый	0,90–0,99
полевой шурф			
1	0–0,20	дёрн	0–0,09
2	0,20–0,70	супесь	0,43–0,52
3	0,70–1,10	суглинок	1,0–1,09
4	1,01–1,60	суглинок	1,48–1,57

Для определения ОГХ и зависимости коэффициента влагопереноса от влажности мы применяли метод центрифугирования на основе использования лабораторной центрифуги ОПН-16. Суть метода центрифугирования заключается во вращении полностью водонасыщенных образцов ненарушенного сложения в центрифуге. При вращении образцы теряют часть влаги, а каждому значению скорости вращения соответствует определенная величина высоты всасывающего давления (при экспериментах высота всасывания достигала 11 050 см).

После вращения при каждом значении скорости вращения образцы взвешивают, рассчитывают их объемную влажность. Выполнена серия опытов по вращению одних и тех же образцов с разной скоростью, таким образом восстанавливается ОГХ. При вращении образцов с заданной скоростью определяли динамику убыли объемной влажности, по которой вычисляли коэффициент влагопереноса. Более подробно метод центрифугирования описан в [Смагин и др., 1998].

После проведения опытов по дренированию водонасыщенных образцов с помощью центрифуги результаты опыта были обработаны для подбора

параметров влагопереноса к экспериментальным кривым ОГХ и коэффициента влагопереноса. Один из способов подбора параметров — использование кода RETC [Van Genuchten et al., 1991], который позволяет провести подбор параметров влагопереноса с применением метода наименьших квадратов при совмещении опытных и модельных кривых ОГХ и коэффициента влагопереноса. Программа предоставляет статистические показатели качества соответствия модельных и опытных кривых, доверительные интервалы подбора параметров, что позволяет оценить качество их подбора согласно уравнениям Ван Генухтена и Муалема, одновременно используя экспериментальные данные о влажности и коэффициенте влагопереноса при заданной высоте всасывающего давления.

После подбора параметров влагопереноса по экспериментальным данным инфильтрационное питание оценивается с помощью моделирования процессов влагообмена на поверхности земли и влагопереноса в зоне аэрации. Суть методики моделирования сводится к последовательному моделированию процессов трансформации осадков на поверхности земли с помощью кода SurfBal [Гриневский et al., 2010]. В результате моделирования при помощи Surfbal формируется переменное во времени атмосферное граничное условие на поверхности земли для уравнения влагопереноса, рассчитывается суточная потенциальная транспирация, потенциальное испарение, а также равновесная высота всасывания на поверхности почвы.

Затем эти данные используются для моделирования вертикального влагопереноса в зоне аэрации от поверхности земли до уровня грунтовых вод с помощью кода HYDRUS-1D [Simunek et al., 2013]. При этом метеорологические условия на поверхности ландшафта описываются интенсивностью поступления осадков, расчетной величиной потенциальной эвапотранспирации и температурой воздуха. Моделирование трансформации осадков на поверхности земли включает задержку влаги растительностью, испарение с поверхности листьев и снега, накопление снежного покрова, его консолидацию и таяние, промерзание верхнего слоя, а также поверхностный сток.

Ландшафтные условия учитываются через особенности растительности (динамика развития листьев, мощность корневой зоны и зависимость транспирационной способности от влажности почвы). Влияние строения зоны аэрации и глубины залегания уровня подземных вод учитывается через гидрофизические характеристики пород зоны аэрации ( $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $\alpha$ ,  $n$ ,  $l$ ,  $k$ ) и граничное условие на нижней границе модели, определяющее водообмен между зоной аэрации и подземными водами. Величина инфильтрации в каждый текущий расчетный момент времени оценивается как расход влаги, поступающей на нижнюю границу расчетного профиля [Гриневский и др., 2010].

Таблица 2

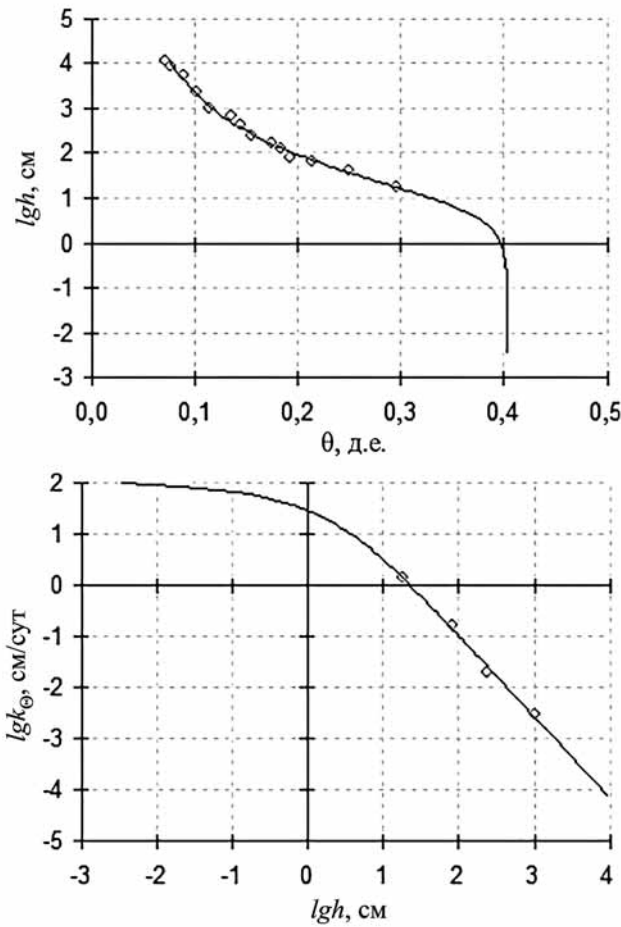
Результаты подбора параметров влагопереноса в программе RETC по экспериментальным данным

Параметр	Лесной шурф			Полевой шурф			
	номер образца			номер образца			
	1	2	3	1	2	3	4
Глубина, см	0–9	35–44	90–99	0–9	43–52	100–109	148–157
Макро-описание	песок	супесь	песок	дерн	супесь	суглинок	суглинок
l	–3,5	–4,1	–2,5	–3,8	–4,5	–8,2	–5,9
$\alpha$ , 1/см	0,143	0,021	0,082	0,050	0,010	0,025	0,004
n	1,320	1,338	1,420	1,344	1,345	1,130	1,181
$\theta_r$	0,042	0,086	0,039	0,112	0,080	0,080	0,078
$\theta_s$	0,403	0,425	0,295	0,481	0,389	0,394	0,360
k, м/сут	1,1	0,04	0,53	0,09	0,01	0,13	0,009

Таблица 3

Значения параметра связности пор исследуемых образцов, использованные для различных сценариев моделирования

Номер слоя	Экспериментальные данные		Референтная фиксированная величина		Литературные данные (база Rosetta)	
	лес	поле	лес	поле	лес	поле
1	–3,5	–3,8	0,5	0,5	–0,87	–1,29
2	–4,1	–4,5			–0,76	–1,28
3	–2,5	–8,2			–0,93	–1,28
4		–5,9				–0,37



Кривая ОГХ и зависимость коэффициента влагопереноса от всасывающего давления для образца с глубины 0–9 см, отобранного из шурфа в лесном ландшафте (песчаная насыпь). Точками показаны экспериментальные данные, линией — модельная зависимость

При анализе полученных по экспериментальным данным величин инфильтрационного питания их сравнивали с значениями питания, полученными при использовании  $l=0,5$  и литературными значениями параметра связности пор для конкретного типа отложений. Литературные значения параметра  $l$  принимались согласно базе данных Rosetta [Schaap et al., 2002], в которой приведены значения параметров влагопереноса для 2085 дисперсных образцов от крупнозернистых песков до суглинков и глин. Значение параметра связности пор принимали средним для этого типа отложений в базе, выбранные параметры приведены в табл. 2.

**Результаты исследований и их обсуждение.** На рисунке приведены характерные кривая ОГХ и зависимость коэффициента влагопереноса от всасывающего давления (аналог кривой влагопроводности), полученные в результате подбора с помощью программы RETC для образца с глубины 0–9 см, отобранного из шурфа в лесном ландшафте.

Подобные кривые были подобраны для всех 7 исследуемых образцов. В результате подбора кривых получены параметры влагопереноса, приведенные в табл. 3.

Полученные значения параметра связности пор для исследованных образцов изменяются от –2,5 до –8,2, в то время как классическая модель Ван Генухтена–Муалема фиксирует, что этот параметр равен 0,5. Однако согласно литературным данным значения параметра  $l$  могут изменяться в широких пределах — от –16 до 5. Как отмечено выше, этот параметр может значительно влиять на результаты моделирования влагопереноса [Wang et al., 2009].

В связи с этим нами исследовано влияние параметра связности пор пород зоны аэрации на составляющие водного баланса путем построения одномерных моделей влагопереноса в программе HYDRUS-1D и сравнения результатов моделирования. Строение моделей соответствовало разрезам пройденных шурфов. Параметры влагопереноса для каждого слоя моделей были заданы согласно результатам подбора в программе RETC по данным экспериментального опробования. Трансформацию осадков на поверхности земли моделировали с помощью кода Surfbal с использованием фактических метеоданных для ЗБС. Нижнее граничное условие задавалось I родом в соответствии с известной глубиной залегания уровня грунтовых вод. Расчет производился за период с 1990 по 2015 г. Выполнено три варианта расчетов для каждого типа ландшафта (табл. 3):

1) с экспериментально определенной величиной параметра связности пор  $l$ ;

2) с величиной параметра связности пор  $l=0,5$  (фиксированная в классической модели Ван Генухтена–Муалема);

3) с величиной параметра связности пор  $l$ , рекомендуемой по литературным данным (база Rosetta [Schaap et al., 2002]) для исследуемого типа пород.

В результате моделирования получены величины инфильтрационного питания, транспирации и испарения из почвы для двух исследуемых площадей, осредненные за период с 1990 по 2015 г. (табл. 4).

Таблица 4

Значения составляющих водного баланса при различных сценариях моделирования для лесного и полевого ландшафта

Значения параметра связности пор	Величина инфильтрационного питания, мм/год		Величина транспирации, мм/год		Величина испарения из почвы, мм/год	
	лес	поле	лес	поле	лес	поле
Экспериментальные данные (–2,5... –8,2)	152	89	281	55	114	323
Литературные данные (–0,4... –1,3)	196	131	260	68	91	268
Референтное (0,5)	199	145	259	80	89	242

При увеличении значений параметра связности пор увеличивается величина инфильтрационного питания подземных вод как для лесного, так и для полевого ландшафта. По приведенным в табл. 4 данным видно, что параметр  $l$  влияет на величину инфильтрационного питания в основном через изменение величины испарения из почвы. При увеличении значения параметра связности пор уменьшается величина испарения из почвы как для полевого, так и для лесного ландшафта. Это уменьшение испарения связано с динамикой формирования просушенного в результате испарения приповерхностного слоя почвы, увлажненного в день выпадения осадков и просыхающего в сухие дни без дождя. Как следует из описанного выше атмосферного граничного условия, испарение прекращается в тот момент, когда на поверхности почвы в результате ее иссушения достигается высота всасывания, равная равновесной высоте  $h_{krit}$ . Характерные абсолютные значения равновесной высоты согласно зависимости (4) составляют 80–150 м. Из уравнений (2) и (3) можно записать, как связано при заданной высоте всасывания  $h$  отношение коэффициента влагопереноса при параметре связности пор  $l$  к референтному значению коэффициента влагопереноса при  $l=0,5$ :

$$\frac{k_{\theta}(l)}{k_{\theta}(l=0,5)} = \left(1 + \left| ah \right|^{-1/(m-1)}\right)^{(1/2-l)m}, \quad (5)$$

Использование в качестве примера параметров верхнего слоя для полевого ландшафта дает, что при равновесной высоте 100 м коэффициент влагопереноса при  $l=-3,8$  примерно в  $10^4$  раз больше, чем при референтном значении  $l$ . А при рекомендованном в литературе значении  $l$  это соотношение составляет всего  $\sim 45$ . Из этих соотношений следует, что для пропускания одного и того же потока влаги вверх к поверхности испарения при больших отрицательных величинах  $l$  необходим существенно меньший градиент высоты всасывания, чем при референтном значении. Следовательно, при референтном значении  $l$  быстрее происходит иссушение приповерхностного слоя, и процесс моделируемого испарения после очередного увлажнения завершается раньше. Таким образом, при референтном значении возникает «излишек» влаги, потенциально доступный для питания. Схожие результаты были получены для аридных условий в работе [Wang et al., 2009]. Так как в целом для полевого ландшафта величина испарения из почвы больше, чем для лесного, изменение параметра связности пор больше влияет на изменение испарения из почвы именно в полевом ландшафте.

Величина транспирации для лесного ландшафта незначительно уменьшается при увеличении значения параметра связности пор, а для полевого ландшафта наблюдается обратная закономерность, причем транспирация увеличивается значительно быстрее. Эта закономерность связана с более активным снижением испарения с увеличением  $l$  в полевом ландшафте, чем в лесном, что обуславливает больший объем влаги, доступный для транспирации в полевом ландшафте.

При использовании экспериментальных значений параметра связности пор получены наименьшие величины расчетного инфильтрационного питания. Следовательно, при использовании рекомендованных литературных данных или фиксированных значений параметра связности пор в результате моделирования влагопереноса в зоне аэрации для условий гумидного климата будут получены завышенные величины инфильтрационного питания как для лесного, так и для полевого ландшафта. Этот результат справедлив для расчетных величин инфильтрационного питания, полученных с помощью моделирования.

**Выводы.** 1. Выявлена значительная чувствительность расчетного инфильтрационного питания подземных вод к параметру связности пор. При увеличении значения параметра связности пор по результатам моделирования увеличивается расчетное инфильтрационное питание как для лесного, так и для полевого ландшафта, что связано в основном с уменьшением испарения из верхнего слоя почвы.

2. Использование литературных данных или фиксированного значения  $l$ , равного 0,5, ведет к

завышению расчетной величины инфильтрационного питания, что обуславливает важность экспериментального определения параметра связности пор при расчетах инфильтрационного питания методом моделирования влагопереноса.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на оценку влияния остальных па-

раметров влагопереноса на расчетную величину инфильтрационного питания в условиях гумидного климата, так как ранее подобные оценки проводились в основном для аридных условий.

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-17-10187).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гриневский С.О., Поздняков С.П. Принципы региональной оценки инфильтрационного питания подземных вод на основе геогидрологических моделей // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 5. С. 543–557.

Смагин А.В., Садовникова Н.В., Мизури Маауиа Бен Али. Определение основной гидрофизической характеристики почв методом центрифугирования // Почвоведение. 1998. № 11. С. 1362–1370.

Шеин Е.В. Курс физики почв: Учебник. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 432 с.

Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media // Water Resour. Res. 1976. Vol. 12, N 3. P. 513–522.

Schaap M.G. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. University of Arizona, 2002.

Schaap M.G., Feike J.L. Improved prediction of unsaturated hydraulic conductivity with the Mualem–Van Genuchten Model // Soil Sci. Soc. Amer. J. 2000. Vol. 64. P. 843–851.

Seboong Oh., Yun K.K., Jun-Woo K. A modified Van Genuchten–Mualem model of hydraulic conductivity in Korean residual soils // Water J. 2015. Vol. 7. P. 5487–5502.

Šimunek J.M., Sejna H.S., Sakai M., Van Genuchten M.T. Hydrus-1D manual version 4.17. Depart. of environ. sci., California, Riverside, University of California. 2013.

Van Genuchten M.T., Leij F.J., Yates S.R. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Riverside: U.S. Department of Agriculture, 1991.

Wang T., Zlotnik V.A., Šimunek J., Schaap M.G. Using pedotransfer functions in vadose zone models for estimating groundwater recharge in semiarid regions // Water Resour. Res. 2009. Vol. 45. Doi 10.1029/2008WR006903.

Wosten J.H., Van Genuchten M.T. Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic functions // Soil Sci. Soc. Amer. J. 1988. Vol. 52. P. 1762–1770.

Yoshiki S., Kazunobu T., Masato K. et al. Evaluation of the tortuosity parameter for forest soils to predict unsaturated hydraulic conductivity // J. For. Res. 2001. Vol. 6. P. 221–225.

Поступила в редакцию 08.10.2019

Поступила с доработки 00.00.2020

Принята к публикации 00.00.2020