

УДК 556.14:556.332.2:556.136:556.164

С.О. Гриневский¹

СХЕМАТИЗАЦИЯ СТРОЕНИЯ И ПАРАМЕТРОВ ЗОНЫ АЭРАЦИИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО ПИТАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД²

На основе обобщения опубликованных данных поинтервального опробования разрезов почв и зоны аэрации получены типовые зависимости всасывающего давления и коэффициента влагопереноса от влажности для основных интервалов почвенного разреза в зависимости от литологического состава пород при разных ландшафтных условиях на поверхности земли. Рассчитаны соответствующие им средние параметры аппроксимации кривых уравнениями Ван Генухтена и показано, что их использование не приводит к существенным ошибкам при моделировании инфильтрационного питания подземных вод.

Ключевые слова: зона аэрации, гидрофизические параметры, влагоперенос, моделирование, инфильтрационное питание подземных вод.

On the base of published soil profiles data the typical retention curves and hydraulic conductivity functions were obtained depending on soil depth, lithological characters and different surface landscape conditions. The corresponding average soil hydraulic parameters for M.Th. van Genuchten equations were estimated. These average soil parameters are suitable for the groundwater recharge estimations based on unsaturated flow modeling.

Key words: vadose zone, soil retention curve, unsaturated hydraulic conductivity, unsaturated flow modeling, groundwater recharge.

Введение. Инфильтрационное питание подземных вод за счет атмосферных осадков — сложный природный многофакторный процесс, непосредственная (*in situ*) количественная оценка которого весьма сложна и неоднозначна. В современной практике гидрогеологических исследований все большее распространение получают методы оценки инфильтрационного питания подземных вод на основе моделирования процессов трансформации атмосферной влаги на поверхности земли и последующего влагопереноса в зоне аэрации [Пашковский, 1985; Гриневский, Поздняков, 2010]. Такие модели, будучи, по сути, комплексными, поскольку рассматривают инфильтрационное питание подземных вод как часть единого водно-балансового цикла [Шестаков, Поздняков, 2003], используются не только в гидрогеологии, но и в смежных науках — почвоведении [Глобус, 1987], гидрологии [Кучмент, Гельфан, 1993] и др., а также при разработке глобальных метеоклиматических моделей отдельных регионов [Гусев, Насонова, 2004].

Важнейшая задача при использовании таких комплексных моделей в региональном масштабе — их параметрическое обеспечение, которое может быть выполнено на основе схематизации типовых природных условий и обобщения данных фактических наблюдений. В частности, для моделирования процессов формирования инфильтрационного питания подземных вод необходимы схематизация разреза зоны аэрации и обоснование гидрофизических параметров

влагопереноса, экспериментальное определение которых весьма затруднительно [Бадов и др., 1988].

В статье на основе обобщения опубликованных данных о строении и гидрофизических характеристиках почвенных профилей рассмотрены принципы схематизации разреза зоны аэрации и обоснована возможность использовать обобщенные параметры модели влагопереноса для оценки инфильтрационного питания подземных вод.

Принципы оценки инфильтрационного питания на основе моделирования влагопереноса в зоне аэрации. Принципиальная модель формирования инфильтрационного питания подземных вод состоит из двух взаимосвязанных блоков:

- трансформации осадков на поверхности земли;
- влагопереноса в зоне аэрации.

Первый расчетный блок определяет условие на верхней границе модели влагопереноса — расход поступления влаги в зону аэрации, формирующийся из атмосферных осадков с учетом временной изменчивости их поступления, которая определяется метеоклиматическими условиями, а также процессов задержания и испарения атмосферной влаги растительностью, снегонакопления и снеготаяния, формирования поверхностного стока. Собственно величина инфильтрации оценивается как расход влаги, поступающей на нижнюю границу модели влагопереноса в зоне аэрации, где задается либо заданный напор, отвечающий глубине залегания

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

² Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 08-05-00720-а).

уровня грунтовых вод (условие 1-го рода), либо условие 3-го рода, определяющее латеральный отток к ближайшей дрене или вертикальный водообмен с более глубокими водоносными горизонтами. Такая модель представлена уравнениями одномерной вертикальной насыщенно-ненасыщенной фильтрации от поверхности земли до уровня грунтовых вод и реализована в широко используемом программном коде HYDRUS-1D [Šimůnek et al., 2005]:

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

$$\theta = \frac{\omega - \omega_{\min}}{\omega_{\max} - \omega_{\min}} = \left[1 + (\alpha |h|)^m \right]^{-n}, \quad m = 1 - \frac{1}{n} \text{ при } h < 0,$$

$$\theta = 1 \text{ при } h \geq 0; \quad (1a)$$

$$k_w = k \sqrt{\theta} \left[1 - (1 - \theta^{1/m})^m \right]^2, \quad (16)$$

где ω — объемная влажность пород; ω_{\min} — доля неподвижной влаги; ω_{\max} — полная влагоемкость; h — высота давления; k — коэффициент фильтрации; TR_p — транспирация; α, n — эмпирические параметры.

Уравнения (1a)–(16) в модели влагопереноса представляют собой численную аппроксимацию (в данной записи — по М.Т. Ван Генухтену [van Genuchten, 1980]) зависимостей всасывающего давления от влажности (основная гидрофизическая характеристика — ОГХ) и коэффициента влагопереноса от влажности (кривая влагопроводности). Входящие в эти уравнения переменные, собственно, и являются параметрами модели влагопереноса, а практическая сложность экспериментального определения кривых ОГХ и влагопроводности [Бадов и др., 1988], а также изменчивость гидрофизических свойств пород в разрезе зоны аэрации определяют проблемы параметрического обеспечения расчетных моделей.

Таким образом, цель исследований — обоснование расчетных параметров модели влагопереноса в зависимости от строения и свойств пород почвенного покрова и зоны аэрации, а также анализ возможности их использования для оценки инфильтрационного питания подземных вод.

Схематизация строения зоны аэрации. Мощность зоны неполного водонасыщения определяется глубиной залегания уровня грунтовых вод (УГВ). Для процессов инфильтрационного питания определяющей является верхняя часть зоны аэрации мощностью в среднем не более 5–6 м, где наиболее существенно изменяется влажность пород и происходит формирование восходящего или нисходящего потока влаги. На большей глубине зоны аэрации (при глубоком залегании УГВ) формируется «транзитный» режим влагопереноса, при котором расход нисходящего потока (инфильтрация) уже практически не меняется [Пашковский, 1985].

Наиболее динамичный режим влажности формируется в почвенной зоне до глубины ~0,6 м (в черноземах — до 1 м), где при любом литологическом составе грунтов наиболее существенно меняются их свойства — плотность, пористость и др., что обусловлено воздействием корневой системы растительности, а также деятельностью живых организмов (рис. 1). Примечательно, что на этой глубине свойства почвы существенно зависят от ландшафта (рис. 1, А, по [Федоров, 1977]) — в лесу они с поверхности гораздо менее плотные и обладают более высокой влагоемкостью, чем в условиях полевого ландшафта. Ниже по разрезу зоны неполного водонасыщения свойства пород становятся более однородными и типичными для их литологического состава и практически не зависят от растительности, развитой на поверхности. Эти же закономерности прослеживаются и по данным других авторов [Роде, 1965; Субботин, 1966; Вериго, Разумова, 1973] (рис. 1, Б) и присущи практически всем основным типам почв.

Таким образом, разрез зоны аэрации можно схематизировать тремя расчетными интервалами. Максимальная изменчивость водно-физических свойств характерна для почвенных горизонтов типа А (дернина, лесная подстилка, перегнойный и гумусовый горизонты) и Е (А₂) — элювиальных почв до глубины ~0,2 м. Затем до глубины, в среднем составляющей ~0,6 м, тенденция к увеличению объемного веса и уменьшению параметров влагоемкости почвы сохраняется, но менее интенсивна. Этому интервалу отвечает иллювиальные почвенные горизонты типа В–В₁. На глубине свыше 0,6 м, отвечающей горизонту В₂ и подстилающим материнским породам (С), водно-физические свойства пород зоны аэрации практически не меняются и отвечают литологическому составу отложений. При этом первые два слоя отражают почвенные горизонты; их водно-физические свойства, помимо механического состава (типа почвы), могут зависеть и от характера ландшафта и растительности на поверхности земли. В разрезе черноземных почв мощность 1-го слоя (горизонта А) следует увеличить до 0,6 м, а интервал иллювиального горизонта принимать от 0,6 до 1 м (рис. 1, Б).

Для выделенных трех модельных слоев гидрофизические параметры принимаются средними по глубине, поскольку, как показало специальное модельное тестирование, учет более мелкой внутренней неоднородности зоны аэрации, особенно на большей глубине, практически не сказывается на итоговых величинах инфильтрационного питания [Пашковский, 1985].

Обоснование параметров влагопереноса для типовых разрезов зоны аэрации. Из-за сложности экспериментальных оценок параметров ОГХ их расчет возможен на основе так называемых педотрансферных функций РТФ (pedotransfer functions), в качестве которых наиболее распространены регрессионные уравнения, связывающие равновесные значения давления и влажности с основными физическими

свойствами почв [Глобус, 1987], которые получены в результате обобщения лабораторных исследований. В зависимости от того, какой набор характеристик почвы используется в РТФ, однозначность параметрической характеристики ОГХ может различаться [Chanzy et al., 2008].

Для практической оценки параметров ОГХ на основе РТФ широко применяется программный код Rosetta (ver 1.1) [Schaap et al., 2001], использующий базу данных почвоведческой службы США (USDA), в этом коде расчет параметров ОГХ осуществляется по фактическому относительному содержанию песчаных, пылеватых и глинистых фракций, объемному весу почвы и характерным величинам влажности (наименьшая влагоемкость и влажность завядания), отвечающим всасывающему давлению 33 и 1500 кПа.

Правомерность использования РТФ, реализованных в программном коде Rosetta, проанализирована на основе лабораторных определений зависимости всасывающего давления от влажности, выполненных под руководством автора студентом М. Ширниным. Для этого на территории Звенигородского учебного полигона геологического факультета МГУ, на первой надпойменной террасе р. Москва, сложенной верхнечетвертичными аллювиальными отложениями [Полевые методы..., 2000], на краю лесного массива отобраны 2 монолита ненарушенной структуры размером 30×30 см с глубины 0,5 и 1 м. Определение гранулометрического состава и водно-физических свойств пород образцов проведено в лаборатории грунтоведения геологического факультета МГУ (табл. 1).

При этом значение наименьшей влагоемкости (НВ) получено расчетным путем по формуле Мичурина [Роде, 1965]:

$$НВ = 1,35ОВ/УВ(1 - ОВ/УВ),$$

а влажности завядания — по эмпирическому уравнению [Campbell, 1985]:

$$ВЗ = 1,5396(НВ)^2 + 0,0967НВ - 0,0044.$$

Экспериментальное определение зависимости всасывающего давления от влажности для рассматриваемых образцов, представленных тяжелой супесью (по классификации В.В. Охотина), выполнялось на капилляриметре [Бадов, Киселев, 1987] в лаборатории института ВНИИ ВОДГЕО под руководством А.А. Киселева. Хорошее соответствие расчетной кривой ОГХ экспериментальным значениям (рис. 2) достигается только при максимальном наборе водно-физических характеристик образца — показателях гранулометрического состава, плотности, наименьшей влагоемкости и влажности завядания.

В контексте исследований необходимо оценить возможность использовать типовые параметры ОГХ применительно к выделенным интервалам разреза почвы и зоны аэрации для основных видов почв, ландшафтов и растительности на поверхности.

Таблица 1

Водно-физические свойства исследуемых образцов

Процентное содержание фракций, мм	Образец 1, глубина 0,5 м	Образец 2, глубина 1,0 м
>0,5	6	8
0,5–0,1	17	20
0,1–0,05	50	31
0,05–0,01	13	25
0,01–0,002	7	7
<0,002	7	9
Удельный вес (УВ), г/см ³	2,45	2,65
Объемный вес (ОВ), г/см ³	1,34	1,77
Пористость	0,454	0,333
Наименьшая влагоемкость (НВ)	0,335	0,300
Влажность завядания (ВЗ)	0,2	0,163

Принципиально такая возможность обусловлена тем, что *генетическое различие почв*, как правило, *не проявляется в форме их ОГХ*, и именно это положение лежит в основе создающихся национальных банков почвенно-гидрофизической информации [Глобус, 1987]. Этим объясняются весьма схожие закономерности изменчивости водно-физических свойств почв с глубиной независимо от генетического типа почвы (рис. 1, А, Б), что позволяет ожидать и соответствующих относительно незначительных вариаций параметров ОГХ в пределах выделенных интервалов зоны аэрации, схожих по механическому (литологическому) составу отложений.

Вместе с тем в ряде исследований отмечается значительная пространственная изменчивость почвенно-гидрофизических характеристик на незначительных по площади территориях [Глобус, 1987]. При этом, однако, возникает вопрос: насколько такая статистическая вариабельность параметров ОГХ значима с точки зрения формирования суммарного потока влаги через зону аэрации, который и определяет величину инфильтрационного питания подземных вод?

Таким образом, для обоснования параметров модели влагопереноса необходимо решить две задачи. Во-первых, обосновать типовые кривые ОГХ и оценить вариацию их параметров применительно к принятой схематизации разреза зоны аэрации, а во-вторых, проанализировать, насколько существенно дисперсия величин параметров ОГХ в модели влагопереноса проявляется в расчетных значениях инфильтрационного питания подземных вод.

Решение первой задачи проведено на основе анализа опубликованных материалов, среди которых выбраны наиболее полно охарактеризованные по механическому составу и водно-физическим свойствам почвенные разрезы, что позволило рассчитать параметры ОГХ на основе педотрансферных функций. Всего использовано около 30 почвенных разрезов, преимущественно для Нечерноземной зоны России,

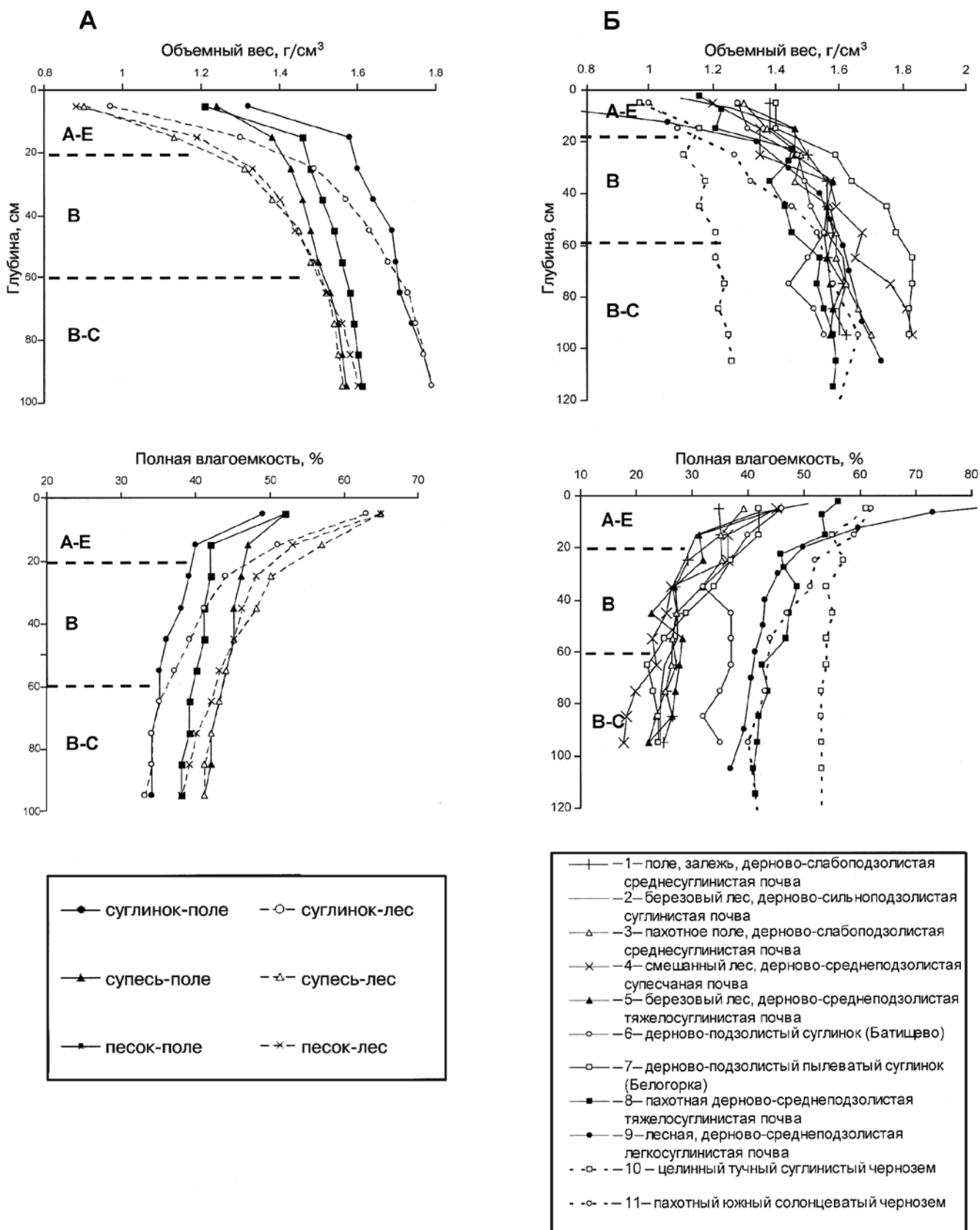


Рис. 1. Изменение объемного веса и влагоемкости пород в зоне неполного водонасыщения с глубиной в зависимости от их литологического состава и ландшафта поверхности по данным: А — С.Ф. Федорова; Б — 1-5 — А.И. Субботина, 6-7 — С.А. Вериги и Л.А. Разумовой, 8-11 — А.А. Роде

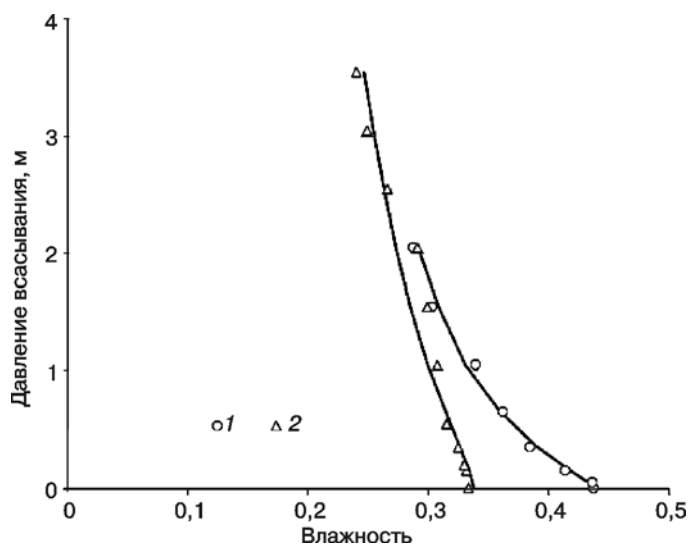


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных (точки) и расчетных (линии) зависимостей всасывающего давления от влажности: 1 — образец 1, глубина 0,5 м; 2 — образец 2, глубина 1 м

для которых имеются поинтервальные показатели гранулометрического состава, характерные значения влажности и объемного веса почв по глубине почвенного разреза с дискретностью от 0,1 до 0,3–0,5 м [Роде, 1965; Субботин, 1966; Вериго, Разумова, 1973; Гусев и др., 2008]. Для них в соответствии с принятой схематизацией разреза зоны аэрации на три расчетных интервала по программе Rosetta получены параметры и рассчитаны кривые ОГХ и влагопроводности,

соответствующие их аппроксимации уравнениями (1а) и (1б).

Анализ расчетных кривых ОГХ, характеризующих свыше 200 интервалов почвенных разрезов, показал, что в пределах каждого почвенного горизонта (А, В, С) независимо от генетического типа почвы они группируются по механическому (гранулометрическому) составу. При этом выделено 4 основных типа разреза — песчаный (<6%), супесчаный (6–15%), суглинистый (15–30%) и глинистый (>30%) — по процентному содержанию глинистых частиц в почвенном интервале в соответствии с классификацией дисперсных грунтов В.В. Охотина.

Характер кривых ОГХ проанализирован также с учетом ландшафтных условий на поверхности, с выделением закрытого (с древесной, лесной растительностью) и открытого (полевого) типов ландшафта; в последнем отдельно рассматривались почвенные разрезы на многолетних травах (далее — луг) и на пахотных землях (далее — пашня).

Поскольку в соответствии с существующими представлениями почвенные гидрофизические характеристики имеют распределение, близкое к нормальному, за исключением коэффициента фильтрации (влагопереноса), распределенного логнормально [Глобус, 1987], каждый интервал разреза зоны аэрации в соответствии с литологическим типом разреза может быть охарактеризован средними значениями параметров ОГХ (табл. 2).

Таблица 2

Расчетные параметры ОГХ для выделенных интервалов разреза зоны аэрации в зависимости от литологического (гранулометрического) состава почвы и подстилающих пород в различных ландшафтах по результатам обобщения данных почвенных разрезов

Тип разреза / ландшафта	Число определений	Минимальная влажность, ω_{\min}		Максимальная влажность, ω_{\max}		α , 1/м		n		k , м/сут	
		среднее	K_v , %	среднее	K_v , %	среднее	K_v , %	среднее	K_v , %	среднее*	K_v , %
Горизонт А, 0–0,2 м											
Суглинки / лес	3	0,037	30,4	0,571	8,4	2,84	40,3	1,317	1,2	0,56	51,7
Суглинки / пашня	7	0,060	29,2	0,472	19,5	1,51	45,0	1,305	4,4	0,053	61,5
Суглинки / луг	19	0,054	27,0	0,529	6,4	1,58	48,1	1,352	4,6	0,049	55,3
Супесь / лес	14	0,038	15,7	0,532	7,0	0,90	59,0	1,486	7,8	0,73	90,6
Супесь / пашня	7	0,044	15,4	0,514	5,6	0,80	59,3	1,645	6,9	0,62	45,6
Супесь / луг	5	0,042	38,4	0,494	8,2	0,72	85,6	1,631	13,7	0,27	27,7
Песок / лес	9	0,029	24,3	0,482	17,6	0,34	36,7	2,280	8,5	3,85	60,9
Песок / пашня	3	0,028	7,7	0,364	7,4	0,22	8,5	2,205	1,2	0,31	31,3
Песок / луг	6	0,030	31,8	0,413	11,9	0,55	40,9	1,744	3,8	1,50	21,3
Горизонт В, 0,2–0,6 м											
Суглинки	30	0,055	17,6	0,427	6,8	0,60	48,8	1,352	7,4	0,07	48,5
Супеси	32	0,038	20,8	0,412	13,3	0,90	41,8	1,442	6,7	0,21	45,2
Пески	17	0,022	11,1	0,366	14,0	1,25	19,3	1,578	12,0	1,21	178,7
Горизонт С, >0,6 м											
Глины	—	0,057	—	0,380	—	0,74	—	1,145	—	0,007	—
Суглинки	48	0,052	19,2	0,383	7,9	0,49	29,0	1,269	6,1	0,04	83,1
Супеси	28	0,034	7,5	0,379	10,9	1,39	44,9	1,361	7,3	0,28	66,1
Пески	18	0,018	28,8	0,370	8,8	2,06	48,0	1,581	8,3	2,96	201,0

* Для коэффициента фильтрации значения среднего и вариации рассчитаны исходя из логнормального закона распределения.

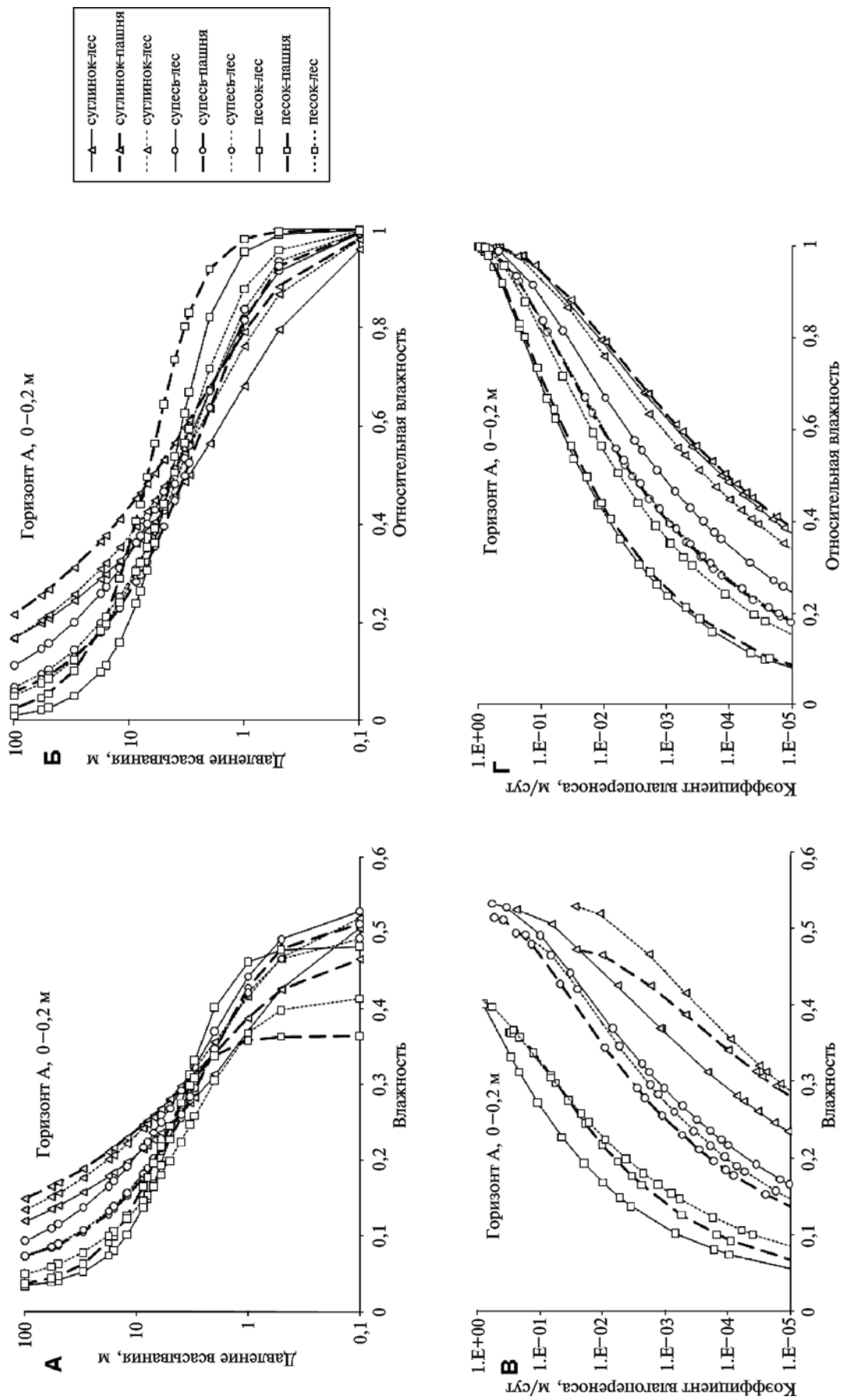


Рис. 3. Расчетные кривые ОГХ (А, Б) и влагопроводности (В, Г) для верхнего горизонта зоны аэрации в зависимости от литологического состава пород и ландшафтных условий на поверхности

Полученные средние значения и анализ соответствующих обобщенных кривых ОГХ и влагопроводности для верхнего интервала (горизонта А) показывают (рис. 3), что здесь прослеживается зависимость параметров влагопереноса не только от литологического состава почвы, но и от типа ландшафтных условий на поверхности, что соответствует рассмотренным выше закономерностям изменчивости основных водно-физических свойств с глубиной (рис. 1, А). Из анализа кривых ОГХ видно, что роль ландшафтных условий на поверхности проявляется главным образом в характерных величинах влажности пород и значениях коэффициента фильтрации (рис. 3, А, В), в то время как сама форма кривых, определяемая значениями коэффициентов α и n уравнений Ван Генухтена (1а) и (1б), зависит преимущественно от литологического состава пород, что отчетливо проявляется на графиках в относительных величинах (рис. 3, Б и Г). При этом наименее значимое влияние ландшафтных условий на поверхности проявляется при суглинистом составе горизонта А.

Наиболее «консервативными» параметрами ОГХ с минимальными значениями коэффициента вариации (K_v) являются величины максимальной влажности и параметра n ; максимальная вариабельность характерна для значений коэффициента фильтрации (табл. 2). Анализ вариаций параметров α и n , определяющих форму кривых ОГХ и влагопроводности, показывает, что значение α более стабильно в песчаных почвах горизонта А, а величина n , наоборот, в суглинистых (рис. 4). Также хорошо прослеживается уменьшение коэффициента α и увеличение параметра n при облегчении состава пород от суглинистого к песчаному.

Для второго рассматриваемого интервала почвенного разреза, отвечающего иллювиальному горизонту В, влияние ландшафтных условий на поверхности проявляется значительно слабее (рис. 5, А). Это вполне объяснимо с позиций генетического формирования иллювиального почвенного горизонта — за счет вымывания солей и наиболее тонких фракций из верхнего слоя, что обуславливает его относительную гидрофизическую однородность. На основании полученных кривых ОГХ для горизонта В можно заключить, что его гидрофизические характеристики следует рассматривать вне зависимости от ландшафтных условий на поверхности и в расчетах влагопереноса использовать осредненные ОГХ, отвечающие различным литологическим разностям. На рис. 5, Б для сравнения приведены также точки экспериментальной кривой ОГХ, полученной по образцу супесчаных пород, отобранному на Звенигородском полигоне с глубины 0,5 м (табл. 1), точки соответствуют усредняющей расчетной кривой для отложений этого типа.

Для горизонта В, так же как и для горизонта А, минимальным диапазоном изменчивости обладают параметр n и максимальная влагоемкость, а макси-

мальная вариация характерна для значений коэффициента фильтрации (табл. 2). Однако, в отличие от горизонта А, значения параметров α и n возрастают от суглинистых отложений к песчаным, при этом диапазон изменчивости коэффициента α существенно выше (рис. 4).

Для подстилающих почву материнских пород зоны аэрации (горизонт С), где водно-физические свойства пород гораздо менее изменчивы с глубиной (рис. 1), анализировать влияние ландшафтных условий на поверхности земли на форму кривых ОГХ и влагопроводности не имеет смысла. Для этих интервалов разреза (глубина свыше 0,6 м) также наблюдается однозначная дифференциация кривых в соответствии с литологическим составом отложений, что позволяет охарактеризовать их обобщающими параметрами (табл. 2, рис. 6). Хотя глубина анализированных почвенных разрезов, как правило, не превышала 1,5 м, выявленные закономерности можно считать характерными и для более глубоких интервалов разреза зоны аэрации — до глубины залегания УГВ. Поскольку в анализируемых данных не описаны отложения, которые, согласно принятой типизации, следует отнести к глинам, параметры ОГХ для данного типа разреза были синтезированы с помощью педотрансферных функций кода Rosetta по относительной величине содержания глинистых частиц 0,45 и плотности 1,8 г/см³.

Расчетные кривые ОГХ и влагопроводности для нижнего интервала разреза зоны аэрации (горизонт С) наиболее контрастно (по сравнению с двумя верхними зонами) отражают различие литологического состава пород (рис. 6). Это объясняется тем, что на данной глубине породы зоны аэрации практически не изменены процессами почвообразования, корневыми системами растений и жизнедеятельностью живых организмов, в связи с чем породы обладают «нормальными» водно-физическими свойствами (плотность, общая пористость, влагоемкость и т.д.), типичными для их литологического (гранулометрического) состава. Иллюстрацией этого служит весьма схожий вид расчетных кривых для этого интервала и типовых кривых соответствующей литологии из базы данных Института почвоведения США (USDA) [Schaap et al., 2001] (рис. 6).

На графике (рис. 6) для сравнения также приведены точки экспериментальной кривой ОГХ, полученной по образцу супесчаных пород, отобранному на Звенигородском полигоне с глубины 1,0 м (табл. 1). Опытные точки отвечают диапазону возможной вариации усредняющей кривой супесчаных отложений, хотя при более высоких значениях давления они больше соответствуют кривой для суглинков.

Вариация параметров влагопереноса для этого интервала разреза зоны аэрации представлена в табл. 2 и на рис. 4. Здесь минимальным диапазоном изменчивости также обладают параметр n и максимальная влагоемкость пород.

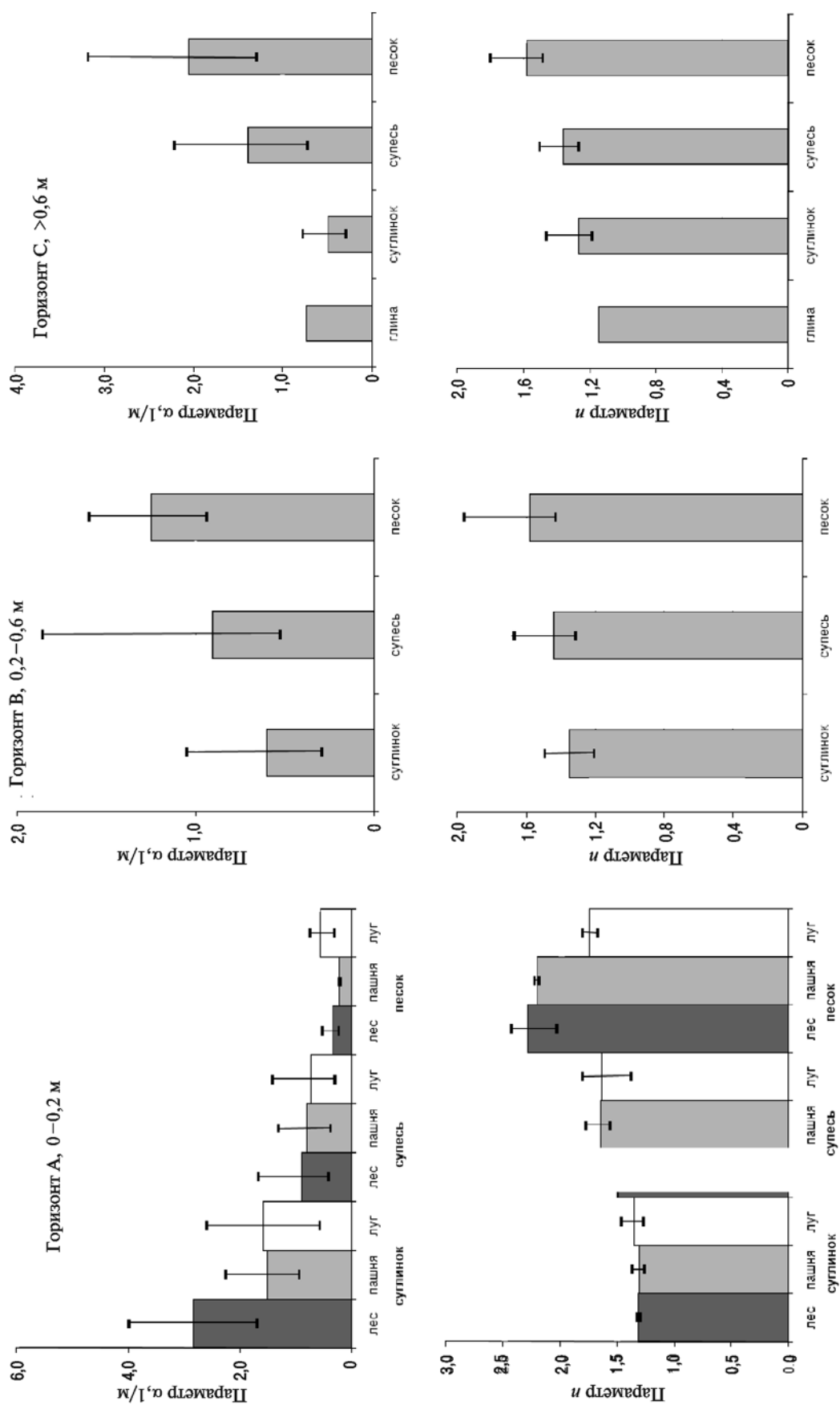


Рис. 4. Гистограммы средних значений параметров ОГХ (α и n) для горизонтов А, Б и С зоны аэрации для различных по литологическому составу пород и ландшафтных условий

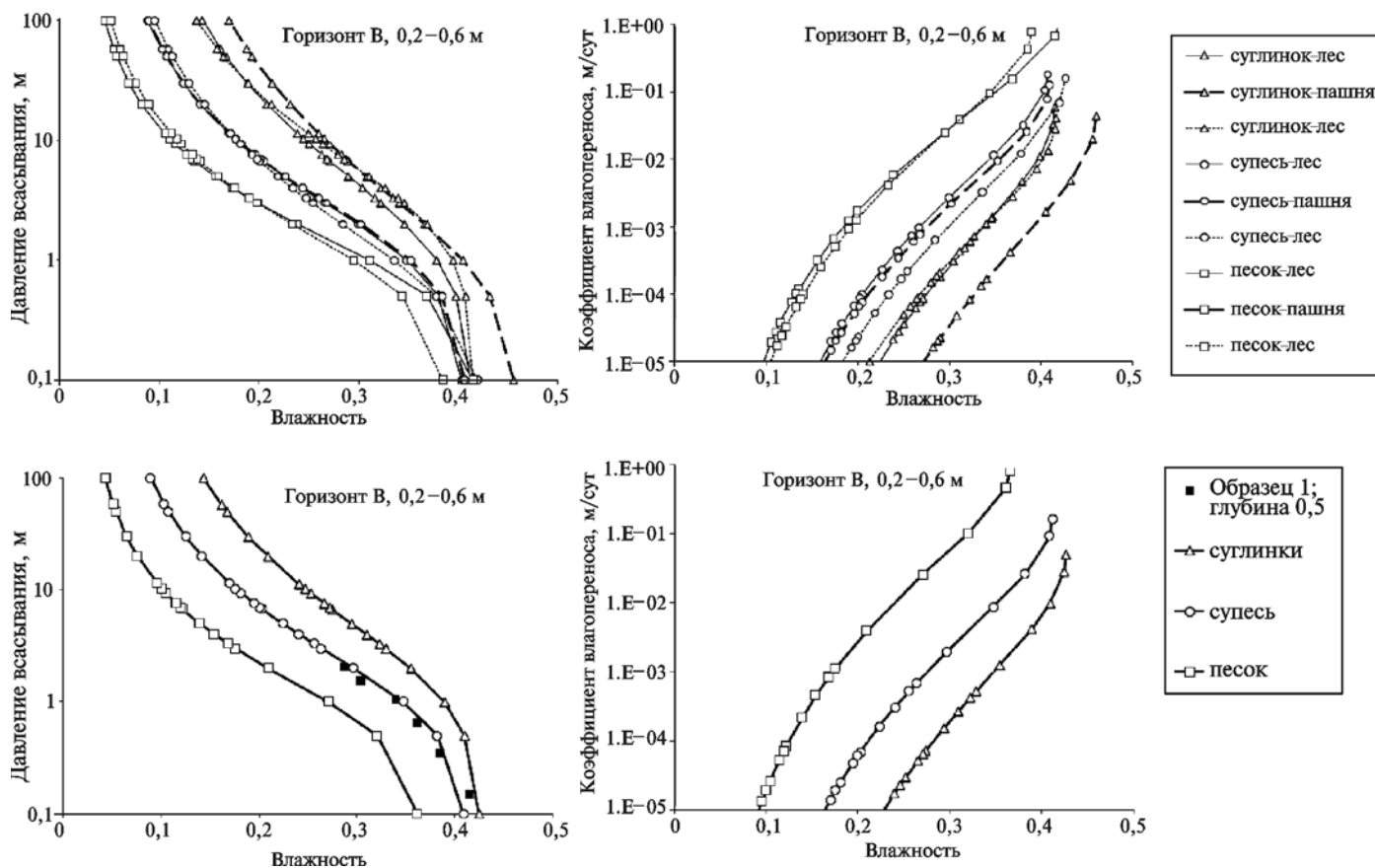


Рис. 5. Расчетные дифференцированные (вверху) и обобщенные (внизу) кривые ОГХ и влагопроводности для второго горизонта зоны аэрации в зависимости от литологического состава пород и ландшафтных условий на поверхности

Таким образом, в результате рассчитаны обобщенные кривые ОГХ и влагопроводности для выделенных литологических типов пород (рис. 7), их параметры и пределы вариации средних значений (табл. 2). При этом получено, что для верхнего почвенного интервала (горизонт А) определенное влияние на форму кривых и параметры ОГХ имеет также тип ландшафтных условий на поверхности. В целом в результате анализа обобщенных кривых ОГХ и влагопроводности (рис. 7) выявлено их существенное отличие для однотипных по литологическому составу пород в зависимости от рассматриваемых интервалов разреза зоны аэрации. Наиболее значимо это различие проявляется при высокой влажности.

Однако, как показал анализ, значения коэффициента вариации полученных средних параметров уравнения Ван Генухтена оказываются во многих случаях весьма значительными (табл. 2). При этом возникают вопросы: как влияет вариация параметров ОГХ на результаты модельной оценки значений инфильтрационного питания подземных вод и насколько правомерно использовать средние значения параметров при моделировании? Для выявления этого проведена серия модельных расчетов, в которых при одинаковых граничных условиях модели влагопереноса (1), представленной тремя схематизированными горизонтами зоны аэрации, оценивалась величина

среднегодового инфильтрационного питания (отток через нижнюю границу модели).

При этом на верхней границе заданы среднесуточные значения поступления влаги на поверхность почвы и величины потенциальной эвапотранспирации, полученные моделированием трансформации осадков на поверхности земли по программе SurfBal [Гриневский, Поздняков, 2010] с использованием многолетних суточных метеоклиматических рядов метеостанции г. Мосальск (Калужская область). На нижней границе модели поддерживался постоянный уровень грунтовых вод на глубине 6 м. В процессе моделирования, проведенного с суточным шагом по времени, последовательно изменялись расчетные параметры влагопереноса каждого горизонта разреза в пределах оцененной вариации значений (табл. 2) при средних параметрах по другим горизонтам. При этом для верхнего горизонта А вариация параметров рассматривалась не только в зависимости от литологического состава отложений, но и от типа ландшафтных условий на поверхности.

Результаты моделирования показывают, что вариация расчетных параметров влагопереноса относительно средних значений несущественно сказывается на итоговых величинах среднегодового инфильтрационного питания подземных вод — в большинстве случаев до 5 мм/год (менее 5–10%)

Таблица 3

Результаты моделирования инфильтрационного питания при вариации расчетных параметров влагопереноса в зоне аэрации

Тип ландшафта	Тип пород (почвы)	Горизонт разреза	Расчетная инфильтрация, мм/год, при значениях параметров влагопереноса		
			средних	минимальных	максимальных
Лес	Суглинки	A	69	76	62
		B		79	60
		C		70	69
	Супеси	A	113	119	111
		B		119	111
		C		116	113
	Пески	A	147	149	148
		B		150	148
		C		151	157
Луг	Суглинки	A	2	6	1
		B		6	0
		C		4	8
	Супеси	A	44	47	50
		B		43	50
		C		47	44
	Пески	A	102	103	105
		B		104	111
		C		105	105
Пашня	Суглинки	A	62	67	57
		B		69	56
		C		60	62
	Супеси	A	82	81	86
		B		86	82
		C		85	82
	Пески	A	86	88	84
		B		89	90
		C		90	93

(табл. 3). Это подтверждает возможность использовать средние параметры кривых ОГХ и влагопроводности в модели влагопереноса для расчета инфильтрационного питания подземных вод в соответствии с принятой схематизацией разреза зоны аэрации и типизацией литологического состава пород.

Выводы. 1. На основе анализа изменчивости водно-физических свойств почвенного покрова и подстилающих коренных пород с глубиной разреза зоны аэрации схематизирован тремя расчетными интервалами, отвечающими основным генетическим почвенным горизонтам А, В и С.

2. Количественный анализ гидрофизических параметров влагопереноса для почвенных разрезов, отличающихся литологическим составом отложений, показывает, что кривые ОГХ и влагопроводности практически не зависят от генетического типа почвы, а в гораздо большей степени определяются литологическим составом почвообразующих пород. При этом для верхнего интервала разреза (горизонт А)

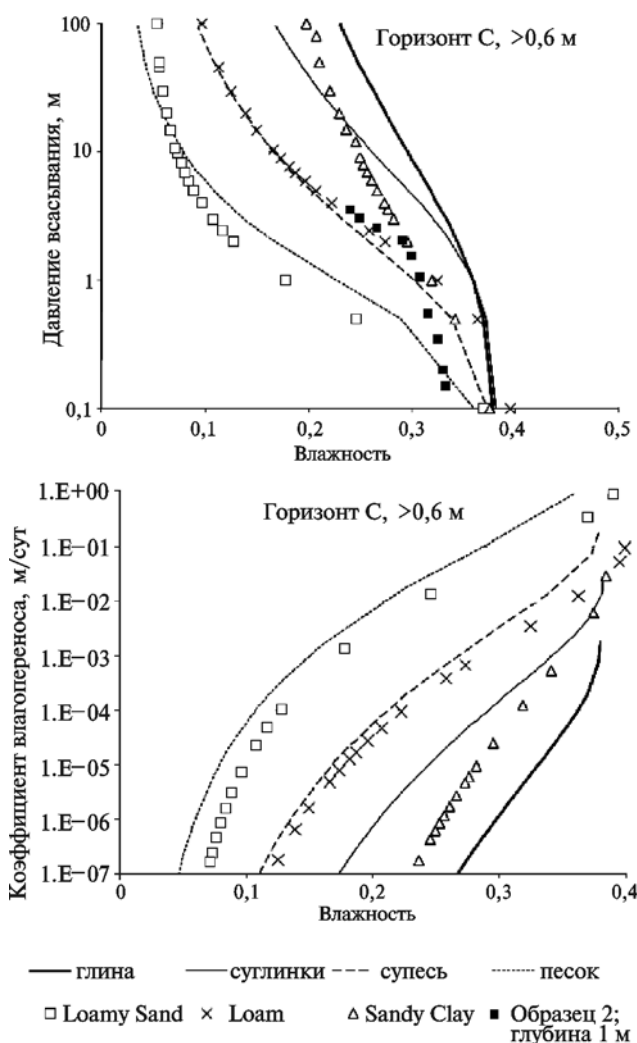


Рис. 6. Расчетные кривые ОГХ и влагопроводности для третьего интервала разреза зоны аэрации (горизонт С) при разном литологическом составе пород (линии) в сравнении с типовыми кривыми из базы данных USDA (точки)

расчетные параметры влагопереноса зависят также от типа ландшафтных условий на поверхности земли за счет процессов разуплотнения и преобразования почвенного покрова, связанных с сельскохозяйственной обработкой земель, деятельностью корневой системы растений и живых организмов. За счет этого характер кривых ОГХ и влагопроводности для верхнего почвенного интервала отличается от характерных зависимостей для соответствующего литологического типа пород. Для более глубоких интервалов разреза зоны аэрации ландшафтные условия и характер растительности практически не сказываются на параметрах влагопереноса и форма кривых ОГХ и влагопроводности определяется только литологическим составом отложений.

3. На основе проведенной для различных почвенных разрезов оценки параметров влагопереноса, отвечающих аппроксимации кривых ОГХ и влагопроводности уравнениями Ван Генухтена, обоснованы средние значения расчетных параметров модели влагопереноса, характеризующие основные интервалы

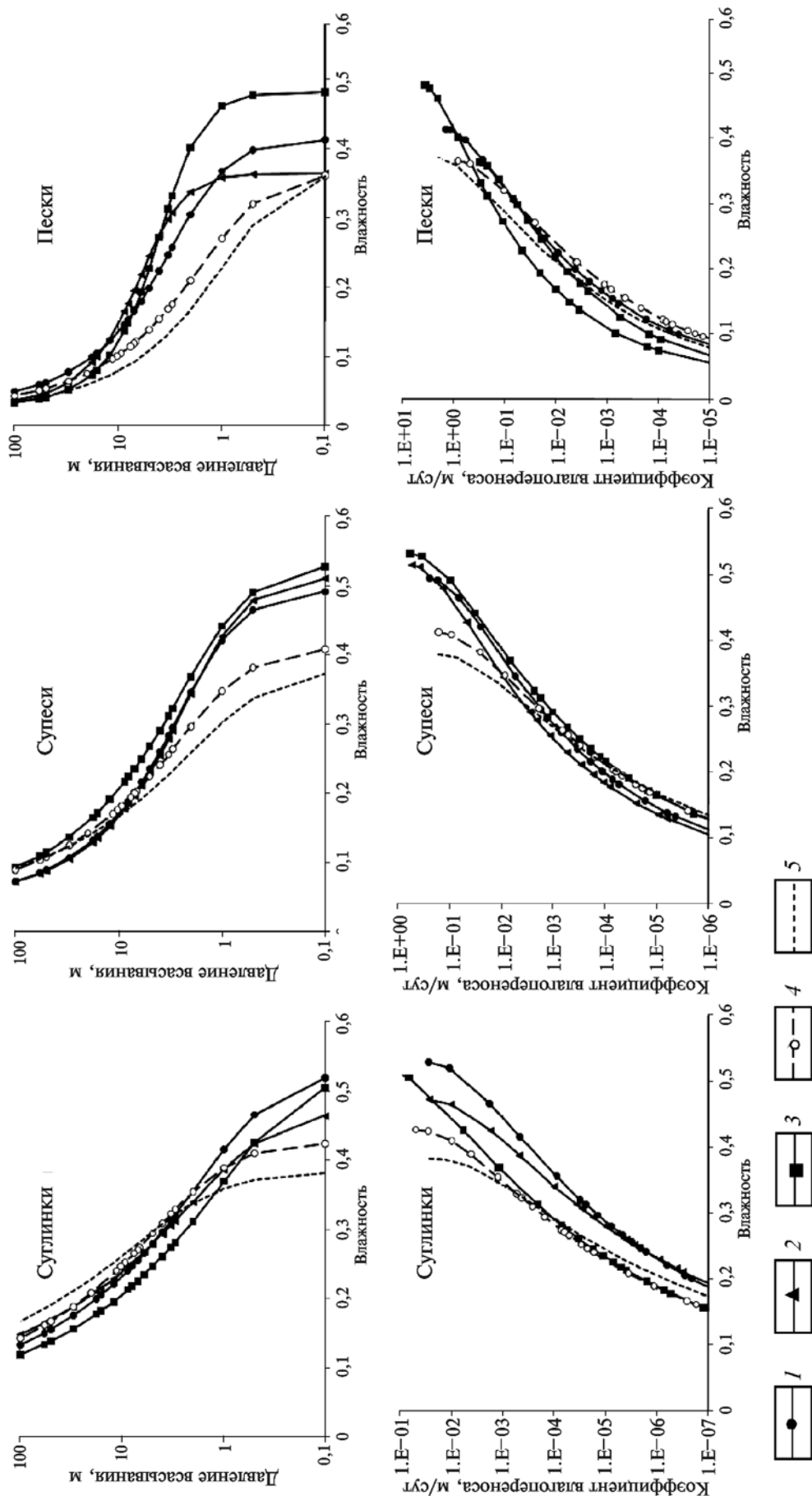


Рис. 7. Результаты кривые ОГХ и влагопроводности для выделенных интервалов разреза зоны аэрации в зависимости от литологического состава пород и ландшафтных условий на поверхности: 1-3 — горизонт А (1 — луг, 2 — пашня, 3 — лес); 4 — горизонт В; 5 — горизонт С

разреза зоны аэрации в соответствии с типом литологического состава отложений, и оценен масштаб их вариации. Результаты тестового моделирования инфильтрационного питания показывают, что изменчивость расчетных параметров влагопереноса в диапазоне их возможной вариации незначительно сказывается на итоговых величинах среднесуточной инфильтрации. Это позволяет использовать полученные параметры модели влагопереноса, характеризующие основные интервалы разреза зоны аэрации и литологический состав пород, для моделирования процессов формирования инфильтрационного питания подземных вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бадов В.В., Киселев А.А. Капилляриметр: Авт. свид-во № 1354068 СССР, МКИ 01 15.08. БИ № 43. 23.11.1987.

Бадов В.В., Киселев А.А., Романова Т.П. Методы экспериментального изучения влагопереноса в ненасыщенных горных породах // Обзор ВИЭМС. Сер. Гидрогеология и инж. геология. М., 1988.

Вериго С.А., Разумова Л.А. Почвенная влага. Л.: Гидрометеоздат, 1973. 328 с.

Глобус А.М. Почвенно-гидрофизическое обеспечение агроэкологических математических моделей. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 427 с.

Гриневский С.О., Поздняков С.П. Принципы региональной оценки инфильтрационного питания подземных вод на основе геогидрологических моделей // Водн. ресурсы. 2010. Т. 37, № 5. С. 1–15.

Гусев Е.М., Насонова О.Н. Проблемы изучения и моделирования тепло- и влагообмена в системе почва–растительный и (или) снежный покров–приземный слой атмосферы // Вод. ресурсы. 2004. Т. 31, № 2. С. 148–164.

Гусев Е.М., Штекауерова В., Стеглова К. и др. Определение гидрофизических характеристик почв водосбора Ивановского водохранилища // Водн. ресурсы. 2008. Т. 35, № 3. С. 348–357.

Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Динамико-стохастические модели формирования речного стока. М.: Наука, 1993. 101 с.

Пашковский И.С. Разработка геофильтрационных моделей системы «зона аэрации–грунтовые воды» и их применение при изучении взаимосвязи подземных и поверхностных вод: Автореф. докт. дис. М., 1985.

Полевые методы гидрогеологических, инженерно-геологических, геоэкологических, инженерно-геофизических и эколого-геологических исследований / Под ред. В.А. Ко-

4. Схематизация строения зоны аэрации и параметров влагопереноса проведена преимущественно на основе анализа почвенных разрезов, типичных для Нечерноземной зоны России, где наиболее распространены почвы дерновые с разной степенью оподзоленности и серые лесные почвы [Почвенно-геологические..., 1984]. Можно предположить, что выявленные закономерности в целом справедливы и для других регионов, однако в связи с малой представительностью проанализированных разрезов других типов почв эта предпосылка нуждается в дальнейшем обосновании.

ролева, Г.И. Гордеевой, С.О. Гриневского, В.А. Богословского. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. 352 с.

Почвенно-геологические условия Нечерноземья / Под ред. Е.М. Сергеева. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. 608 с.

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

Субботин А.И. Сток талых и дождевых вод (по экспериментальным данным). М.: Гидрометеоздат, 1966. 374 с.

Федоров С.Ф. Исследование элементов водного баланса в лесной зоне европейской территории СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1977. 264 с.

Шестаков В.М., Поздняков С.П. Геогидрология. М.: Академкнига, 2003. 173 с.

Campbell G.S. Soil Physics with BASIC: Transport models for soil-plant systems. Amsterdam: Elsevier, 1985. 150 p.

Chanzy A., Mumen M., Richard G. Accuracy of top soil moisture simulation using a mechanistic model with limited soil characterization // Water Res. 2008. Vol. 44 (W03432, doi:10.1029/2006WR005765, 2008).

Genuchten M.Th. van. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils // Soil Sci. Soc. Amer. J. 1980. Vol. 44. P. 892–898.

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., Genuchten M.Th. van, Šejna M. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Ver. 3.0. // Prepr. Depart. of Environ. Sci. University of California Riverside. California, Riverside, 2005. 270 p.

Поступила в редакцию
15.12.2009