

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРОДСКИХ ПОЧВ

УДК 631.4

КАПИЛЛЯРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПОЛИДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ПОЧВЕННОМ КОНСТРУИРОВАНИИ

© 2021 г. А. В. Смагин^{a, b, c, *}, Н. Б. Садовникова^{a, b}, Е. А. Беляева^b,
А. В. Кириченко^a, В. Н. Кривцова^a

^aМГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

^bИнститут лесоведения РАН, ул. Советская, 21, Успенское, Московская обл., 143030 Россия

^cРоссийский университет дружбы народов, ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, 117198 Россия

*e-mail: smagin@list.ru

Поступила в редакцию 08.02.2021 г.

После доработки 24.03.2021 г.

Принята к публикации 07.04.2021 г.

Обсуждается капиллярный эффект в полидисперсных пористых системах почв и грунтов. Его количественная оценка основана на новой фундаментальной модели капиллярного подъема в зависимости от параметров дисперсности почвенных частиц, плотности сложения почвы и плотности ее твердой фазы, смачиваемости и количества прочносвязанной воды. В отличие от известного закона Жюрена, модель учитывает распределение частиц по размерам и изменение размера пор под влиянием плотности грунта. Модель адекватно предсказывает высоту капиллярного подъема как в искусственных монодисперсных пористых системах, так и в реальных почвах со спектрами частиц разного размера от 0.006 до 1 мм. Исследовано влияние природных и синтетических гидрофобизаторов на кинетику и предельную высоту капиллярного подъема. Приводятся результаты лабораторных и полевых исследований эффективности несовершенных – с гидравлической связью и совершенных – с эффектом ее разрыва капиллярных барьеров в сравнении с прогнозным моделированием в программе Hydrus-1D. Полученные результаты используются для оценки капиллярности в почвах и дизайна почвенных конструкций с капиллярными барьерами.

Ключевые слова: почвы и грунты, капиллярный подъем, гранулометрический состав, удельная поверхность, плотность сложения, кривые водоудерживания, гидрофобизация, краевые углы смачивания, капиллярные барьеры

DOI: 10.31857/S0032180X21090100

ВВЕДЕНИЕ

Капиллярность является одним из наиболее важных физических явлений в полидисперсных пористых системах почв и грунтов. Она контролирует водоудерживание, влагопроводность, прочность, пластичность, липкость, а также многочисленные экологические и технические функции и сервисы капиллярно-пористых систем [2–5, 8, 11, 15]. Особо значим точный расчет капиллярного поднятия для инженерного почвенного конструирования (интеллектуального почвенного дизайна) с целью оптимального водоснабжения растений, предотвращения вторичного засоления и загрязнения корневой зоны водорастворимыми веществами [6, 7, 9, 10]. Несмотря на важное значение капиллярности, ее количественная оценка для полидисперсных пористых сред разработана недостаточно хорошо. Известный закон Жюрена описывает капиллярный подъем в идеальной однородной системе с фиксированным размером

частиц или капилляров. Очевидно, это слишком грубое приближение для реальных полидисперсных пористых сред с переменной пористостью. Оценка равновесной капиллярности по кривым водоудерживания (ОГХ) со значениями модуля давления почвенной влаги выше 1 атм, заложенная в современных компьютерных софтах по моделированию движения влаги в распределенных пористых средах [22, 27, 30], является также проблемной и противоречит эмпирическим сведениям о конечной, определенной для каждой градации по гранулометрическому составу предельной высоте капиллярного подъема [4, 7]. Компьютерное моделирование дает в пределе равновесное распределение в форме самой ОГХ, то есть подъем воды на любую высоту, тогда как в природе высота капиллярного подъема конечна, и даже в самых тонкодисперсных почвах не превышает 4–6 м (модуль предельного капиллярного давления не более 60 кПа или 0.6 атм.) [2–4, 7, 15–17]. Эти проблемы определили актуальность и цель дан-

ной работы в виде экспериментального исследования и моделирования капиллярных эффектов в полидисперсных пористых средах в связи с их использованием и регуляцией в интеллектуальном почвенном дизайне. Задачи включали разработку и верификацию физически-обоснованной модели капиллярного подъема в почвах и грунтах, развивающей фундаментальный закон Жюрена, анализ основных факторов модели, контролирующих капиллярность и использование полученных результатов при проектировании почвенных конструкций с капиллярными барьерами. Новизна разработок и практическая значимость состояли в адекватном прогнозировании капиллярности по данным о гранулометрическом составе и плотности сложения полидисперсных пористых сред и материалов, возможности инженерного расчета капиллярных барьеров и влагоемкости в почвенных конструкциях, технологиях аккумуляции воды и блокирования вторичного засоления (техногенного загрязнения) плодородного слоя.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В работе задействована авторская база данных физических и физико-химических свойств евразийских почв, впервые опубликованная в работе [25] и дополненная последующими материалами [5–7, 23, 24, 26]. Она объединяет более 400 образцов различных текстурных классов (160 – пески, пылеватые пески и супеси, 110 – легкие и средние суглинки, 130 – тяжелые суглинки и глины) основных генетических горизонтов (A1, Ap, E, B, BC, C) разных типов почв Евразии (ареносоли (Arenosols) и бурые полупустынные (Xerosols), подзолы, дерново-подзолистые (Podzols, Podzoluvisols), серые и бурые лесные почвы (Phaeozems и Cambisols), черноземы, каштановые почвы (Chernozems, Kastanozems), солончаки, солонцы, солоды, вертисоли (Solonchaks, Solonetz, Solodic Planosols, Vertisols)), а также их композиций с природными и синтетическими почвообразователями (механоактивированный торф, акриловые гели, гидрофобизирующие агенты). Гранулометрический состав определялся классическим методом седиментации в стоячей воде [2, 15] и методом лазерной дифракции [18] с использованием анализатора размеров частиц Microtrac S-3000 (США). ОГХ оценивались методом равновесного центрифугирования на центрифугах ЦЛС-3, ЦЛН-16 (РФ), Hettich Universal 320 (Германия) в нашей модификации, учитывающей наряду с центробежной силой, действие гравитационного поля [5, 25].

Капиллярный подъем воды в лабораторных экспериментах с образцами представительной (243 образца) выборки песчаных, супесчаных, легко- и среднесуглинистых почв из Волгоградской, Ростовской, Оренбургской, Самарской, Читин-

ской обл., Ставропольского края, Якутии, Бурятии, Хакасии, Тувы, Украины, Эстонии, Венгрии, Румынии, ОАЭ (Дубаи), Бахрейна, Катара оценивался методом почвенных колонн [4, 15]. Прозрачные стеклянные или пластиковые колонки диаметром 0.5–1 см, высотой от 0.5 до 2 м равномерно заполняли высушенной на воздухе и просеянной через сито 1 мм почвой. Некоторые образцы обрабатывали гидрофобизаторами посредством импультверизации (аэрозоли) или пропитки (водные растворы) с последующей сушкой на воздухе, определением гигроскопической влажности и расчетом дозы почвомодификатора по разности масс твердой фазы до и после обработки. В качестве гидрофобных почвомодификаторов использовались: ацетоновый экстракт с нефтяными углеводородами (Салымское месторождение, РФ), бытовые препараты в виде аэрозолей “Chirton” (бутан, пропан, смесь восков, смесь силиконов, керосин, вода) и “Universal SMS Waterproof” (синтетические смолы, пропан, бутан), а также метилсиликат калия (торговая марка Софэксил®-40, www.sofex.ru). Воздушно-сухие образцы и их гидрофобизированные варианты в открытых сверху колонках устанавливались вертикально в пластиковые стаканы с дистиллированной водой, уровень которой поддерживался ручной компенсацией удаляющегося по мере капиллярного впитывания количества воды. Высота капиллярного подъема (h) в зависимости от времени (t) в прозрачных колонках определялась визуально с точностью 1 мм по прикрепленным вдоль колонок отрезкам металлической рулетки. Плотность твердой фазы (ρ_s) оценивалась пикнометрически [2], а плотность сложения почвы (ρ_b) – по соотношению массы твердой фазы образца и объема колонки. Для моделирования кинетики капиллярного подъема $U = dh/dt$ был использован модифицированный закон Дарси в форме [5]:

$$\frac{dh}{dt} = K \left[\frac{H_c}{h} - 1 \right], \quad (1)$$

где K , [см/мин] – коэффициент влагопроводности, H_c , [см] – равновесная (конечная) высота капиллярного подъема или эквивалентный напор капиллярного давления в см водного столба. В координатах $x = 1/h$; $y = U = dh/dt$; модель (1) преобразуется в линейное уравнение: $y = mx - n$, где $m = KH_c$, $n = K$. После аппроксимации экспериментальных данных $U(x)$ этим уравнением, конечная высота капиллярного подъема оценивалась по формуле [5]:

$$H_c = m/n. \quad (2)$$

Длительность экспериментов – неделя – для песков и супесей и 2–3 недели для суглинков – обеспечивала капиллярный подъем до $0.7–0.9H_c$.

Капиллярное рассасывание в слоистых системах исследовалось в стеклянных трубках 3×11 см, заполненных пылевато-песчаной ареносолью (ОАЭ, Дубаи, гор. А1) с прослоями акрилового гидрогеля (радиационнощитый технический полиакриламид [6]), низинного торфа (Тверская обл.), промышленно механоактивированного с целью измельчения и гомогенизации исходного сырья, и кварцевого щебня (2–3 мм). В этих экспериментах капиллярно насыщенный влагой слой почвы или ее композиции с 0.2% гидрогелем размещался в середине трубки над воздушно-сухой почвой или капиллярными барьерами из торфа и щебня и засыпался сверху пылевато-песчаной ареносолью. Происходящее под действием капиллярных сил рассасывание из увлажненного срединного слоя вверх и вниз оценивалось визуально с замером во времени в течение 2 сут расширения границы между влажной и сухой почвой.

Объем прочносвязанной адсорбированной (неподвижной) воды оценивался по изотермам сорбции водяного пара, полученным методом динамической газовой хроматографии [5, 24]. Согласно [24], точка перегиба изотерм сорбции водяного пара соответствует содержанию адсорбированной воды (W_a) в почвенно-дисперсных системах. Все лабораторные эксперименты, кроме гранулометрии, проводились в трехкратной повторности с последующей статистической и математической обработкой данных в компьютерных программах MS Excel 2007 и S-Plot-11 по [1].

В полевых условиях высота капиллярного подъема определялась по границе капиллярной каймы над грунтовыми водами буровым или шурфовым методами [2, 4] на дерново-подзолистых супесчаных, легко и среднесуглинистых почвах (Московская область), средне- и тяжелосуглинистых черноземах (Липецкая область, Краснодарский край), пылевато-песчаных ареносолях (ОАЭ, Бахрейн) с уровнем залегания грунтовых вод от 1.5 до 3.4 м. Наряду с собственными экспериментальными данными были использованы литературные источники [2–8, 23–26] по лабораторным и полевым исследованиям капиллярного подъема в почвах и грунтах разной дисперсности и генеза, а также в отдельных гранулометрических фракциях.

Технологическое моделирование при интеллектуальном дизайне слоистых почвенных конструкций с капиллярными барьерами осуществлялось в программе Hydrus-1D [22] согласно [7]. Тестирование конструкций проводилось на лабораторных макетах малого размера в трехкратной повторности (перфорированные со дна прозрачные емкости из оргстекла $13 \times 13 \times 50$ см со встроенными диэлектрическими датчиками влажности SH-0453 (РФ), заполненные гомогенным кварцевым песком (контроль) и с 10 см слоем

0.2% акрилового гидрогеля), а также в полевых условиях на (урбо)дерново-подзолистой супесчаной почве стационарных площадок ИЛАН РАН в Серебряноборском опытном лесничестве ЗАО г. Москвы (N55.77090274; E37.39450062) с размерами индивидуальных рендомизированных ячеек 5×5 м, оборудованных датчиками температуры, влажности DS1923, 5TE-Decagon (США) и AMN-300 (Китай) и съёмными монолитами-реперами для оценки динамики запаса влаги и солей через каждые 1–2 дня портативным диэлькометром MS-98 (КНР) и кондуктометром HI Dist WP (Hanna Inst.) по методике [7]. Монолиты в пластиковых ПВХ-трубах 5×50 см помещались в обсаженные поронолом вертикальные скважины с гидравлическим контактом нижнего торца монолита и подпочвы через пороноловую губку [7]. В качестве загрязняющей солевой метки использовался раствор хлорида натрия, исходно формирующий в монолите слабый уровень засоления (электропроводность порядка 6 дСм/м), допустимый для большинства злаков [19]. Экспериментальные площадки были подготовлены с помощью спецтехники (экскаватор погрузчик JCB 3CX), использованной для снятия 50-сантиметрового верхнего слоя, размещения в подпочве 10-сантиметрового щебнистого экрана (дорожно-строительный щебень размером 3–6 см) на геотекстиле и восстановления верхней плодородной толщи с внедрением в нее 10-сантиметровых прослоев 100% механоактивированного низинного торфа (Тверская обл.), 0.2% акрилового гидрогеля (опытная партия Уральского химзавода, препарат ВУМ-0 с наполнителем в виде отходов биокаталитического производства полиакриламида [6]) и 0.2% силиконового гидрофобизатора СофЭксил®-40 в исходном почвогрунте. На площадках был произведен разовый влагозарядковый полив (общий запас влаги 300 мм) посредством дождевания из брандспойта с распыляющей насадкой с контролем равномерности с помощью расставленных по полю мерных емкостей. После полива был осуществлен посев универсальной газонной травосмеси (райграс пастбищный, овсяница красная, мятлик луговой, норма высева 50 г/м^2) с укрыванием поверхности лутрасилом до момента появления всходов. Эксперимент проводился в условиях экстремальной засухи с 13 июля по 30 августа 2010 г. без дополнительного орошения газонов, исключая исходный влагозарядковый полив, что позволило рельефно выявить преимущества влагоаккумулятивных слоистых почвенных конструкций с капиллярными барьерами для городского озеленения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Модель капиллярности в полидисперсной пористой среде. В заданных термодинамических усло-

виях для смачивающейся вязкой жидкости капиллярный подъем, очевидно, должен контролироваться дисперсностью (удельной поверхностью) и свободным объемом капиллярно-пористой системы, проницаемым для жидкости. Удельную поверхность частиц почвы, обтекаемых вязкой жидкостью, или так называемую площадь поверхности скелета почв и грунтов (S_{sc}) удобно оценивать на основе гранулометрических распределений частиц по формулам [7]:

– дискретное распределение частиц по размерам (D_i) с процентным содержанием (n_i):

$$S_{sc} = \sum_{0.006}^1 \left(\frac{6n_i}{\rho_s D_i} \right) / 100, \quad (3)$$

– непрерывное распределение частиц:

$$S_{sc} = \frac{6}{\rho_s} \int_{0.006}^1 \frac{f(D)}{D} dD, \quad (4)$$

где D – эффективный диаметр частицы, $f(D)$ – дифференциальное распределение функции гранулометрических элементов, полученное экспериментально в диапазоне от 0.006 до 1 мм ρ_s – плотность твердой фазы. Выбранный диапазон характеризует условно нижнюю и верхнюю границу капиллярности, согласно [4], поскольку пористые дисперсные системы с размерами частиц более 1 мм не обладают капиллярностью, а максимальной из всех известных оценок высот капиллярного подъема в почвах и грунтах величине в 6 м соответствует размер пор по Жюрену в 0.0049 мм или размер шарообразных частиц в 0.0068 мм при их кубической упаковке. Подстановка значений D в мм и ρ_s в г/см³ в формулы (3), (4) дает размерность S_{sc} в м²/кг. Современный гранулометрический анализ, например лазерная дифрактометрия, определяет функцию $f(D)$ непосредственно. В классических методах гранулометрии (ареометрия, седиментация в стоячей воде) обычно получают небольшое количество различных фракций [2, 8]. Их кумулятивная кривая ($F(D)$) может быть в первом приближении достаточно точно аппроксимирована простой логистической моделью [7, 29]:

$$F(D) = \frac{100}{\exp\left(\frac{a-D}{b}\right) + 1}, \quad (5)$$

где a , b – эмпирические параметры аппроксимации. Дифференцирование (5) по D дает функцию (6) для дифференциального распределения частиц:

$$f(D) = \frac{dF}{dD} = \frac{25}{b \text{Ch}^2\left(\frac{a-D}{2b}\right)}, \quad (6)$$

где Ch – гиперболический косинус. Функция (6) с известными параметрами a , b после подстановки в (4) позволяет оценить параметр S_{sc} численным интегрированием в диапазоне $0.006 \leq D \leq 1$ мм. Параметр S_{sc} является базовым для модели капиллярного подъема в полидисперсных пористых системах, основанной на следующих предположениях.

Для получения теоретической модели использования обобщенное уравнение Лапласа: $P_c = \sigma_{l/g} dS/dV$, где P_c – капиллярное (лапласово) давление, $\sigma_{l/g}$ – поверхностное натяжение на границе раздела вода/воздух, dS/dV – кривизна границы раздела [11, 25]. Учитывая, что $H_c = P_c/(\rho_l g)$, (ρ_l – плотность воды, g – ускорение свободного падения), а кривизну в первом (линейном) приближении можно представить как отношение площади поверхности скелета (S_{sc}) к объему пор за вычетом сильно адсорбированной неподвижной воды (W_a), получаем следующую формулу:

$$H_c = \frac{\sigma_{l/g} S_{sc} \rho_b \cos(\alpha)}{\rho_l g \left[1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} - \frac{\rho_b W_a}{\rho_l} \right]}. \quad (7)$$

Модель (7) определяет капиллярный подъем в смачиваемых $0 < \cos(\alpha) \leq 1$ полидисперсных пористых системах в зависимости от их гранулометрического состава (интегральный показатель S_{sc}), плотности сложения (ρ_b), минералогического и химического состава (показатель ρ_s), а также массовой доли прочносвязанной адсорбированной неподвижной воды (W_a). В качестве частных случаев в нее входят известные классические формулы Митчерлиха, Цункера, Хайнца, Фишера, Кина, Нерпина [3–5, 15] для расчета капиллярного подъема в идеальных грунтах из сферических частиц известного размера ($D = 6/(S_{sc} \rho_s)$) в диапазоне естественного для почв и грунтов варьирования показателей $1.0 \leq \rho_b \leq 1.7$ г/см³, $2.0 \leq \rho_s \leq 2.7$ г/см³ [2, 8].

Экспериментальные исследования капиллярности; анализ контролирующих факторов. На рис. 1 показана скорость капиллярного подъема в почвах легкого гранулометрического состава до и после обработки гидрофобизирующим агентом в виде 1% растворов гуматов. Все экспериментальные данные удовлетворительно описываются модифицированным уравнением Дарси (модель (1)) с достаточно высокими коэффициентами детерминации ($R^2 = 0.82–0.99$). Максимальные высоты капиллярного подъема (H_c), рассчитанные по формуле (2), показаны на рисунке прямоугольными рамками. Они варьировали в диапазоне 15–115 см в зависимости от типа почв, дисперсности и гидрофильности частиц твердой фазы. Обработка гуматами приводит к уменьшению капиллярного подъема в 5–15 раз. Этот результат, на наш взгляд,

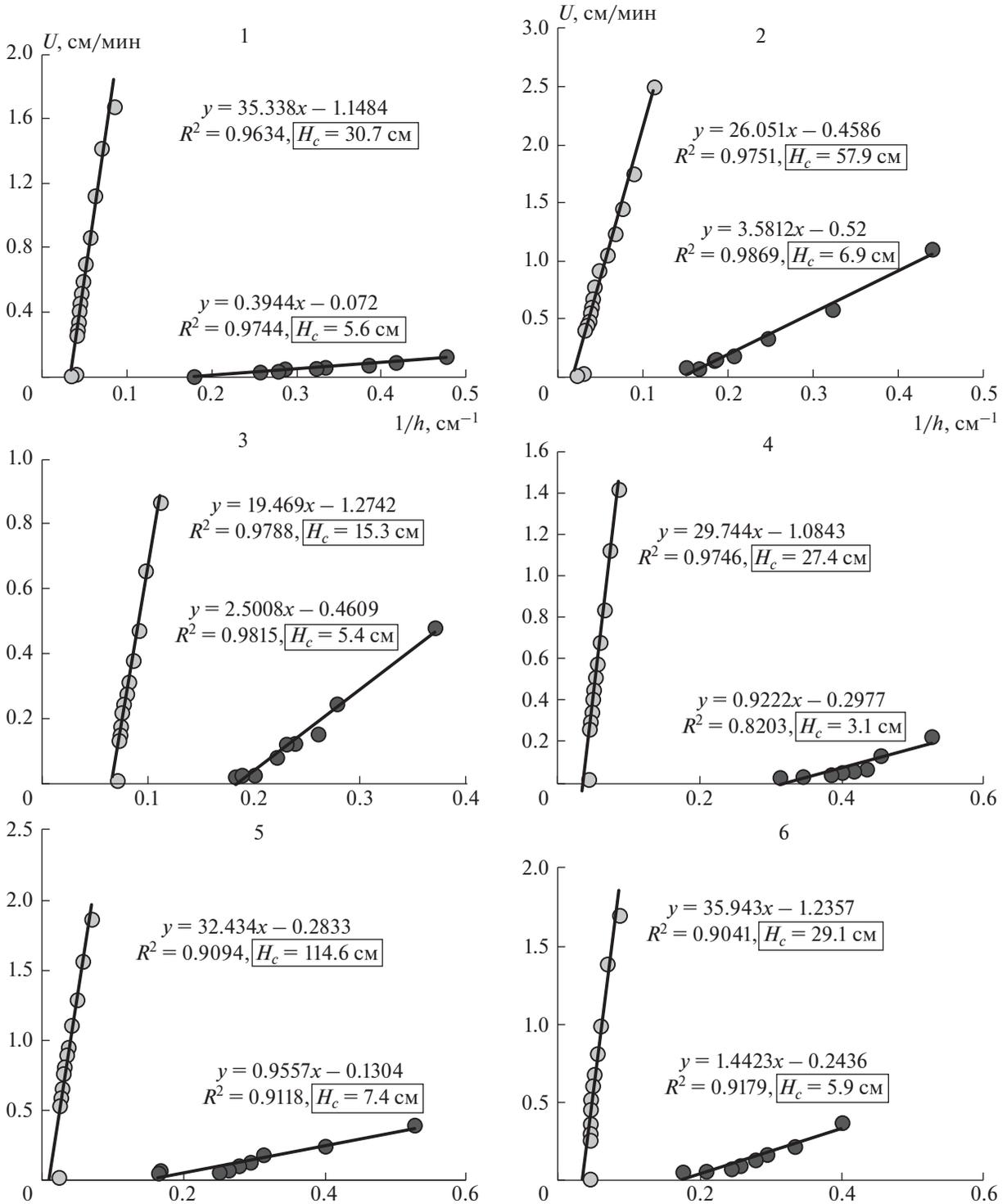


Рис. 1. Кинетика капиллярного подъема и ее описание модифицированным уравнением Дарси (прямые линии – аппроксимация формулой (1)). Обозначения: 1, 2 – песчаные и супесчаные дерново-подзолистые почвы (Самарская и Читинская области), 3 – полиминеральная песчаная ареносоль (Ставропольский край), 4 – супесчаный чернозем (Волгоградская область), 5, 6 – пылевато-песчаные и песчаные ареносоли (Дубаи, Бахрейн); серые символы – естественные почвы, черные символы – обработка 1% гуматами.

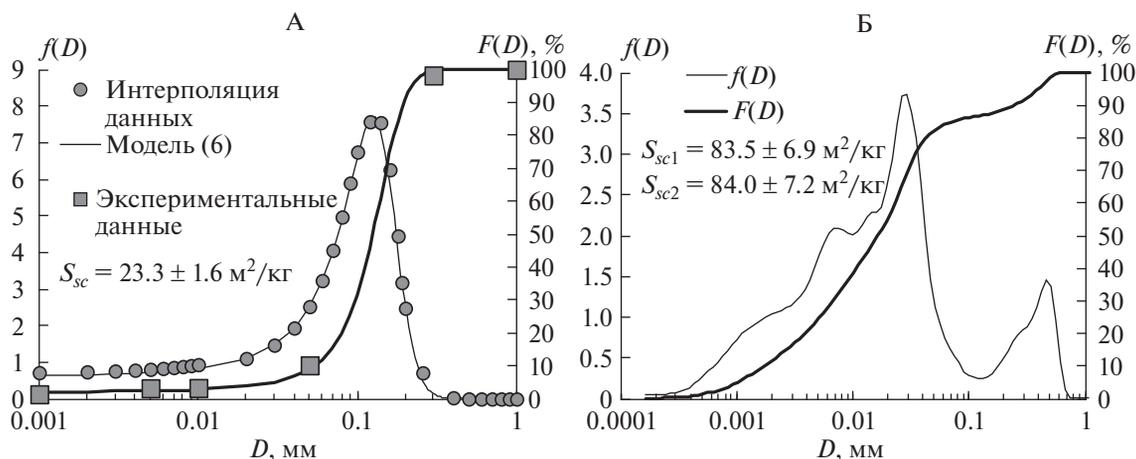


Рис. 2. Пример оценки параметра S_{sc} в супесчаной дерново-подзолистой почве (А) и суглинистом черноземе (Б) по гранулометрическим данным. Обозначения: А – аналитический подход для дискретных распределений. Параметры моделей (5) и (6): $a = 0.1256 \pm 0.0006$, $b = 0.0324 \pm 0.0004$, $R^2 = 0.996$, $s = 0.14$, параметры статистически значимы при $p < 0.0001$; Б – численный подход для непрерывных мультимодальных распределений.

объясняет высокую эффективность гуматов в засушливых почвах [21]. Небольшие дозы этого гидрофобизирующего агента значительно уменьшают капиллярность и, следовательно, испарение ирригационной воды, согласно известной модели капиллярного испарения [14, 15].

Следующий рисунок иллюстрирует методологию оценки удельной поверхности почвенного скелета по данным гранулометрического анализа. На рис. 2, А показаны результаты обработки моделями (5), (6) экспериментальных данных, полученных классическим методом седиментации с фракционированием частиц [2] для гор. А1 супесчаной дерново-подзолистой почвы (Московская обл.). Модели адекватно описывают кумулятивные и дифференциальные кривые гранулометрического состава с высоким коэффициентом детерминации ($R^2 = 0.996$), небольшой стандартной ошибкой аппроксимации ($s = 0.14\%$) и статистически значимыми ($p < 0.0001$) параметрами моделей. Подстановка уравнения (6) с известными параметрами a , b в формулу (4) с последующим численным интегрированием в пределах $0.006 \leq D \leq 1$ мм дает значение S_{sc} для этого образца, равное $23 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Современные методы гранулометрии [18, 29] позволяют получать практически непрерывные спектры частиц (рис. 2, Б). Такие распределения часто бывают бимодальными или мультимодальными, поэтому простые двухпараметрические модели (5), (6) не могут их адекватно описать. Использование более сложных моделей этих распределений, например [13] с 9–14 параметрами, слишком усложняет аналитические расчеты. В этом случае мы предлагаем оценивать параметр S_{sc} путем прямого суммирования удельных поверхностей отдельных частиц с учетом их доли в

общем распределении по формуле (3). Альтернативный подход заключается в численном интегрировании непрерывного распределения с использованием формулы (4). Оба метода дают почти одинаковые результаты (см. оценки S_{sc1} и S_{sc2} на рис. 2, Б). Использование вместо (3) или (4) упрощенного расчета, основанного на среднем арифметическом или средневзвешенном диаметре частиц, в принципе неверно и дает сильное (до 2–6 раз) занижение значения S_{sc} , поскольку поверхность частиц аддитивна, а их размер – нет.

Параметр S_{sc} позволяет оценивать капиллярный подъем в полидисперсной пористой системе по фундаментальной формуле (7). Например, для супесчаной дерново-подзолистой почвы со значением $S_{sc} = 23.3 \pm 1.6 \text{ м}^2/\text{кг}$, плотностью сложения $\rho_b = 1.4 \text{ г}/\text{см}^3$, плотностью твердой фазы $\rho_s = 2.65 \text{ г}/\text{см}^3$ и прочносвязанной адсорбированной водой с долей $W_a = 0.012 \text{ кг}/\text{кг}$ значение H_c составляет $0.53 \pm 0.03 \text{ м}$. Аналогичное значение для суглинистого чернозема составляет $1.73 \pm 0.14 \text{ м}$ при $S_{sc} = 83.5 \pm 6.9 \text{ м}^2/\text{кг}$, $\rho_b = 1.3 \text{ г}/\text{см}^3$, $\rho_s = 2.62 \text{ г}/\text{см}^3$ и $W_a = 0.033 \text{ кг}/\text{кг}$.

Анализ чувствительности модели (7) показывает, что интегральный показатель дисперсности (S_{sc}) является наиболее значимым предиктором капиллярного подъема. Наибольший разброс данных происходит в тонкодисперсных образцах ($S_{sc} > 100 \text{ м}^2/\text{кг}$). В песках и супесях ($S_{sc} < 30 \text{ м}^2/\text{кг}$) пары значений S_{sc} (предиктор) и H_c (отклик) тесно сгруппированы вокруг прямой линии $H_c = kS_{sc}$, где $k = 2.4 \pm 0.03 \text{ см} \cdot \text{кг}/\text{м}^2$ при $p < 0.0001$. В этом случае каждый квадратный метр удельной поверхности почвенного скелета на кг твердой фазы дает 2–3 см капиллярного подъема.

Чувствительность к параметру плотности сложения при постоянных значениях S_{sc} от 5 до 150 м²/кг выявляет для рыхлых образцов ($\rho_b = 1.1\text{--}1.2$ г/см³) 17–20% увеличение капиллярного подъема на каждые 0.1 г/см³ уплотнения. Для плотных образцов ($\rho_b = 1.4\text{--}1.6$ г/см³) каждые 0.1 г/см³ дают 30–50% H_c . Этот результат хорошо объясняет известный способ регулирования испарения воды путем рыхления почвы [4, 14–17]. Плотность твердой фазы почвы также оказывает значимое влияние на высоту капиллярного подъема. Если дисперсность и плотность сложения невелики ($S_{sc} < 20$ м²/кг, $\rho_b = 1.1\text{--}1.2$ г/см³), то варьирование показателя ρ_s в обычном диапазоне от 2.62 до 2.7 г/см³ дает изменение значения H_c на 12–15%. При высокой дисперсности и плотности сложения грунта ($S_{sc} = 100\text{--}200$ м²/кг, $\rho_b = 1.5\text{--}1.6$ г/см³) такое же варьирование ρ_s приводит к 30–50% изменениям капиллярного подъема.

Вклад адсорбированной прочносвязанной влаги для рыхлых грубодисперсных образцов ($S_{sc} < 20$ м²/кг) незначителен (менее 5–6%). Однако для плотных ($\rho_b = 1.4\text{--}1.5$ г/см³) тонкодисперсных ($S_{sc} > 100$ м²/кг) образцов он становится существенным и достигает 15–25%. В таких образцах неподвижная прочносвязанная вода может занимать многочисленные мелкие поры с высокими значениями сдвигового напряжения, что с точки зрения классической физики почв является одной из главных причин ограничения капиллярного подъема [4, 8, 17]. Параметр смачиваемости ($\cos(\alpha)$) обычно в моделях капиллярного подъема воды в минеральных почвах и грунтах обычно принимается равным 1, что, в принципе, допустимо, учитывая его зависимость от влажности [5]. Плохо смачивающиеся сухие минеральные почвы с отличными от нуля краевыми углами смачивания (КУС) по мере впитывания воды образуют стабильные водные пленки, по которым в дальнейшем происходит растекание (КУС = 0) [5]. Однако покрытие минеральной твердой фазы органическими веществами как природными, так и синтетическими с низкоэнергетической поверхностью сильно понижает смачиваемость [12, 20], и вслед за этим, – капиллярный подъем (рис. 3, А, Б). Сопоставление высот капиллярного подъема контрольных и обработанных образцов позволяет оценивать КУС исходя из прямой пропорциональности H_c и $\cos(\alpha)$. Резкое (до 5–15 раз) уменьшение капиллярности после обработки гуматами соответствует увеличению КУС от 0 до 70°–86°. В связи с этим аккумуляция гидрофобных органических веществ в составе гумуса типа “мор” или под воздействием пожаров может значительно снижать капиллярность вслед за снижением смачиваемости [5, 12, 20]. Обработка аэрозольными гидрофобизаторами, нефтяным

экстрактом и 0.2% раствором метилсиликоната калия на примере пылевато-песчаной ареносоли (Дубай) приводит к еще более значительному снижению H_c вплоть до 120–280 раз в вариантах 10, 11 (рис. 3 дан в логарифмическом масштабе). Такое снижение соответствовало величинам КУС вплоть до 89.5°–89.8°, то есть значимо не отличающимся от условной границы перехода к несмачиванию (90°) и нижнего теоретического предела оценки КУС данным методом [5].

Сравнение экспериментальных (колоночный метод) и модельных (7) оценок высот максимального капиллярного подъема для всех исследованных в лабораторных экспериментах образцов легкого и среднего гранулометрического состава (выборка 243 образцов), а также для почв, изученных в полевых условиях, включая тяжелосуглинистые черноземы, выявило хорошее соответствие обоих величин друг другу (рис. 4, А). Основной график на рисунке представляет полный диапазон коррелируемых значений, врезка – его начальную треть. Во всем диапазоне изменения реальных (H_{c2}) и модельных (H_{c1}) значений от 0 до 200 см присутствует тесная ($R^2 = 0.95\text{--}0.98$) линейная зависимость ($H_{c2} = kH_{c1}$, где $k = 0.986\text{--}0.998$ при $p < 0.0001$). Эта взаимосвязь указывает на фактическую идентичность сравниваемых величин и хорошую адекватность модели (7). Наибольший разброс данных со значительными (20–25%) отклонениями от корреляционной линии наблюдается при высоких (150–200 см) значениях высот капиллярного подъема, то есть в тонкодисперсных почвах. Этот результат объясняется усилением влияния других управляющих факторов (ρ_b , ρ_s , W_a , $\cos(\alpha)$) в тонкодисперсных почвах по сравнению с грубодисперсными, как следует из приведенного выше анализа чувствительности модели (7). Известные полевые наблюдения капиллярного подъема также показывают большой разброс этого показателя (50–100 см и более) в почвах и грунтах среднего и тяжелого гранулометрического состава [4].

Дополнительная проверка прогнозных свойств модели (7) осуществлялась на независимом литературном материале [4] о капиллярном подъеме воды в монодисперсных пористых системах, представленных гранулометрическими фракциями почвенных частиц фиксированного размера (рис. 4, Б). Этот анализ позволил сравнить модель (7) с известным уравнением Жюрена [4, 11]. Обе модели, как показывает рисунок, вполне адекватно описывают капиллярный подъем в монодисперсных системах. Связь между измеренными (H_{c2}) и рассчитанными (H_{c1}) значениями капиллярного подъема, как и в случае полидисперсных образцов, представлена близкой линейной регрессией $H_{c2} = kH_{c1}$, где $k = 0.964\text{--}1.000$ при $p < 0.0001$. Однако значение параметра достовер-

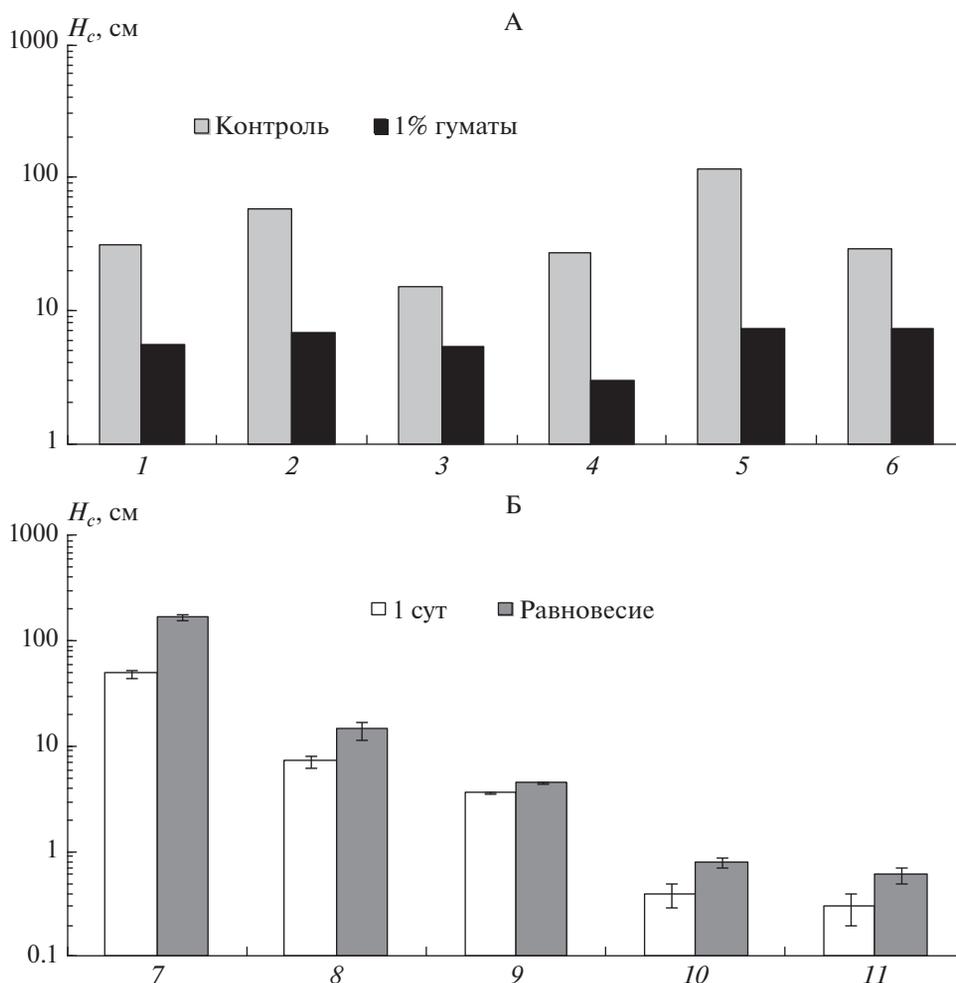


Рис. 3. Влияние гидрофобизации на капиллярный подъем в почвах. Обозначения: А – обработка 1% гуматами, 1–6 – см. обозначения на рис. 1; Б – пылевато-песчаная ареносоль (Дубай): 7 – необработанный контроль; варианты обработки: 8 – нефтяным экстрактом (1%), 9 – аэрозолем “Chirton” (0.8%), 10 – аэрозолем “Universal SMS” (0.5%), 11 – метилсиликатом К (0.2%); первый столбец диаграммы – подъем за 1 сутки, второй – равновесная высота подъема по формуле (2).

ности аппроксимации ($R^2 = 0.881$) для уравнения Жюрена значительно ниже, чем для модели (7), где значение R^2 достигает 0.995. Этот факт дает основание констатировать лучший прогноз капиллярности по модели (7) по сравнению с законом Жюрена и в монодисперсных системах по причине учета факторов их плотности сложения и содержания прочносвязанной адсорбированной влаги.

Капиллярность и водоудерживание, капиллярные барьеры. Полученные экспериментальные и расчетные результаты по предельной высоте капиллярного подъема для представительной выборки (243 образца) почв разного генезиса и дисперсности были проанализированы во взаимосвязи с их влагемкостью (рис. 4, В). В качестве последней величины использовались как значения равновесной влажности в верхней части ко-

лонн до 2 м (лабораторный анализ капиллярного подъема), так и значения влажности точки пересечения имеющих ОГХ почв с предельной высотой капиллярного подъема, рассчитанной по модели (7) с использованием данных о гранулометрическом составе, плотности сложения почвы, плотности твердой фазы и количества адсорбированной прочносвязанной влаги при условно полном смачивании ($\cos(\alpha) = 1$). При этом высота капиллярного подъема была трансформирована в модуль эквивалентного капиллярного давления (P_c): $|P_c| = H_c \rho_l g$ или $|P_c|$, кПа $\approx 0.1 H_c$, см. Полученная при этом связь хорошо удовлетворяла эмпирической степенной модели $y = ax^b$ с высоким коэффициентом детерминации ($R^2 = 0.986$), небольшой стандартной ошибкой аппроксимации ($s = 2.5$ кПа) и статистически достоверными при $p < 0.0001$ коэффициентами $a = 0.15 \pm 0.01$, $b =$

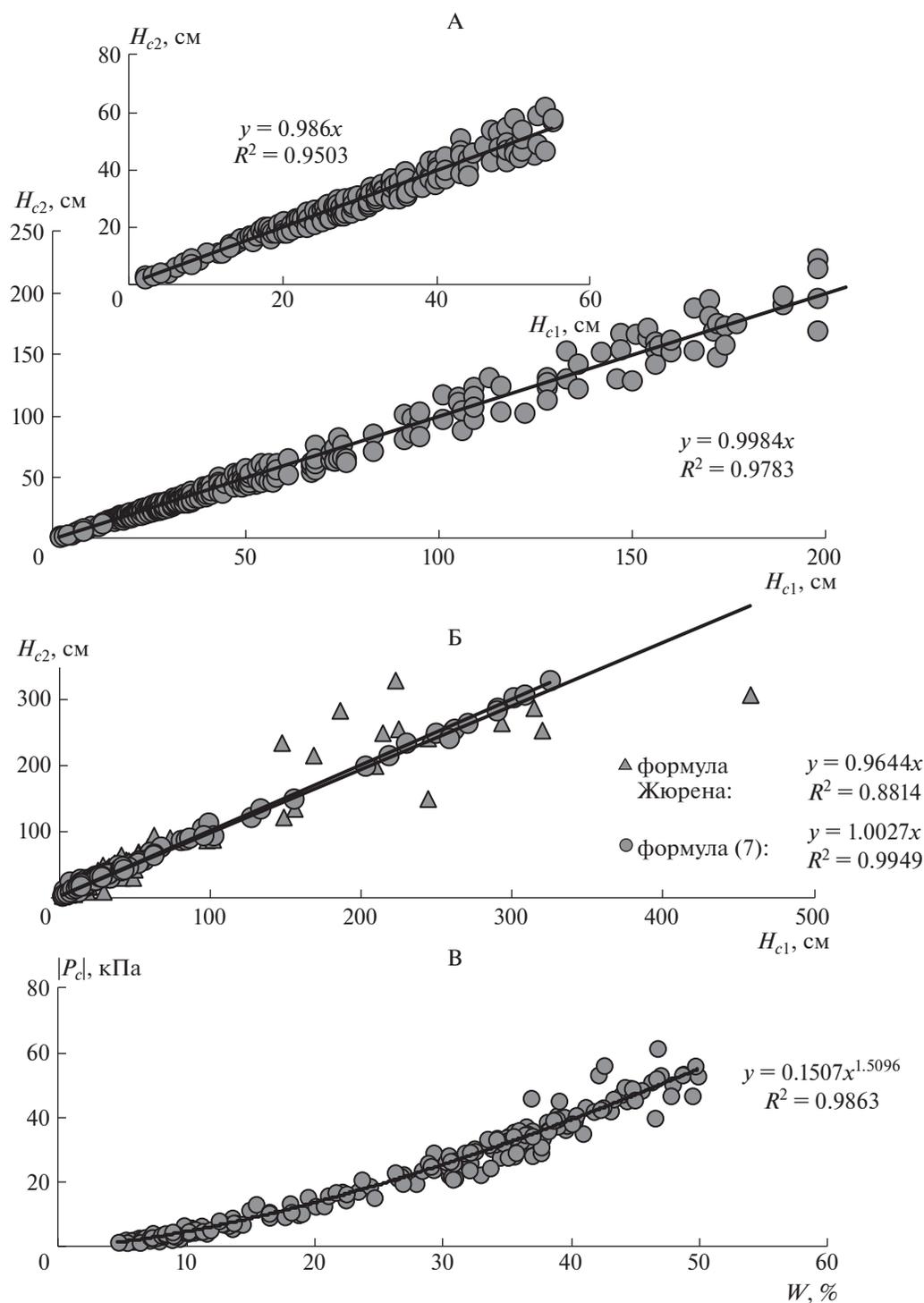


Рис. 4. Расчетные (H_{c1}) и экспериментальные (H_{c2}) оценки высот капиллярного подъема, связь капиллярного давления (P_c) и влагоемкости ($W, \%$). Обозначения: А – полидисперсные системы почв и грунтов (эксперимент); Б – монодисперсные системы гранулометрических фракций почвенных частиц (обработка данных [4]); В – связь P_c и $W, \%$.

$= 1.51 \pm 0.03$, что позволило нам предложить упрощенное уравнение (модель) вида:

$$H_c, \text{ дм} = |P_c|, \text{ кПа} = 0.15W\%^{3/2}. \quad (8)$$

Пока неясно, есть ли физический смысл в полученном на большом эмпирическом материале коэффициенте $3/2$ в модели (8), например, исходя из фрактальности поверхности раздела фаз в

полидисперсной пористой системе [8, 23], но модель, на наш взгляд, может использоваться вместо уравнения секущей Воронина [28] $\lg|P_c| = 1.17 + W\%/100$ для определения величины наименьшей влагоемкости (НВ) почв и грунтов по их ОГХ, особенно для грубодисперсных объектов, где метод Воронина нередко дает занижение НВ [25].

Новая модель может быть также применена для улучшенного прогнозирования капиллярных свойств почв и грунтов в связи с экологическими проблемами дефицита водных ресурсов и вторичного засоления, и, в частности, для конструирования почв с капиллярными барьерами и гелевыми структурами [6, 7, 10, 11]. Предельная высота капиллярного подъема и, соответственно, развития макрокапиллярных сил, позволяет оценивать максимальную мощность слоя “подвешенной” влаги (H_w) при подстилании тонкодисперсных почв более легкими по гранулометрическому составу отложениями или капиллярными барьерами для почвенного конструирования. Мы выделяем 2 типа таких барьеров – несовершенные, с сохранением гидравлической связи и совершенные, в которых капиллярный эффект полностью блокируется, например некапиллярными крупнопористыми материалами (щебень, гравий) или гидрофобизацией [6]. Действие двух типов капиллярных барьеров в экспериментах со стеклянными трубками иллюстрирует рис. 5. Исходная пылевато-песчаная ареносоль (Дубай) обладает высокой капиллярностью, поэтому импульс влаги в средней части колонны быстро (за 2 сут) рассасывается в обе стороны, как в самой почве, так и из более влагоемкой композиции с гидрогелем. Внедрение гидрофобизирующего прослоя торфа (несовершенный барьер) блокирует рассасывание вниз, частично – для почвы, и фактически полностью – для ее композиции с водоудерживающим гелем. Слой гравия (совершенный барьер) полностью блокирует капиллярное рассасывание вглубь не зависимо от водоудерживающей способности верхней толщи (почва или 0.1% гель).

Величина H_w для несовершенных барьеров определяется разностью между капиллярным потенциалом воды данного слоя (Ψ_1) и аналогичной величиной для подстилающего капиллярного барьера (Ψ_2) или, разностью максимальных высот капиллярного подъема воды в материалах обоих слоев [3, 5]: $H_w = (\Psi_1 - \Psi_2)/g = H_{c1} - H_{c2}$. Если материал подстилающего грубодисперсного экрана вообще лишен капиллярности, то есть $\Psi_2 = 0$, тогда $H_w = H_{c1}$. Это означает, что *мощность рабочего (культурного) слоя почвенной конструкции над таким экраном не должна превышать высоты капиллярного подъема влаги в нем*, в противном случае “подвешивание” влаги будет сопровождаться неизбежными непродуктивными потерями воды ат-

мосферных осадков и поливов в виде гравитационного стока в экран.

При влагозарядковых поливах (осадках) для оценки влагоемкости почв с мощностью равной или больше предельной высоты капиллярного подъема ($H \geq H_c$) надо отложить на оси давлений (потенциалов) почвенной влаги графика ОГХ величину критического (предельного) капиллярного давления, численно равного высоте капиллярного подъема ($P_c = H_c \rho g$), и тогда абсцисса, соответствующая точке пересечения этой секущей линии с кривой ОГХ даст величину равновесной влажности (НВ) в верхней части исследуемой почвы. В короткопрофильных почвах мощностью меньше предельной высоты капиллярного подъема ($H < H_c$), для определения НВ необходимо использовать в качестве секущей предельное капиллярное давление, численно равное самой мощности почвы (H) [7, 25]. Равновесная влажность при этом будет, очевидно, всегда выше, чем НВ для глубокопрофильных почв, так как $H < H_c$ (модуль критического капиллярного давления меньше – влажность больше).

Использование капиллярных эффектов в дизайне почвенных конструкций. Одно из наиболее интересных практических приложений исследования это проектирование почвенных конструкций с капиллярными барьерами для городского озеленения в условиях дефицита влаги и опасности загрязнения (засоления) плодородного слоя водорастворимыми поллютантами. Рис. 6 иллюстрирует предварительные лабораторные результаты на макетах почвенных конструкций, сопоставляя экспериментальные данные аккумуляции влаги с расчетом по предложенной выше методике и более трудоемким компьютерным технологическим моделированием в программе Hydrus-1D [7, 22]. Поскольку мощности слоев конструкции были равны предельной высоте капиллярного подъема или меньше ее ($H \leq H_c$) в гомогенном среднезернистом кварцевом песке и его композиции с акриловым гидрогелем, здесь равновесные распределения влажности, соответствующие НВ, должны были повторять ОГХ, что и подтвердилось экспериментально. Наша оценка влагоемкости по высоте капиллярного подъема ($H_{V(8)}$) с использованием формулы (8) дала для верхней части капиллярной каймы под слоем геля влажность 7.3%, близкую к экспериментальным данным равновесия на 50 и 140 сут (6.2–7.8%) и к оценке по ОГХ (7.4%) в форме смоделированного Hydrus-1D равновесного распределения влажности. Отметим, что использование секущей Воронина [28] для модели ОГХ ван-Генухтена [27] привело к сильному (до 5 раз) занижению влагоемкости ($H_{V(8)} = 1.5$) относительно нашей оценки по (8), расчета по Hydrus-1D и реальных данных. В несовершенном капиллярном барьере в виде

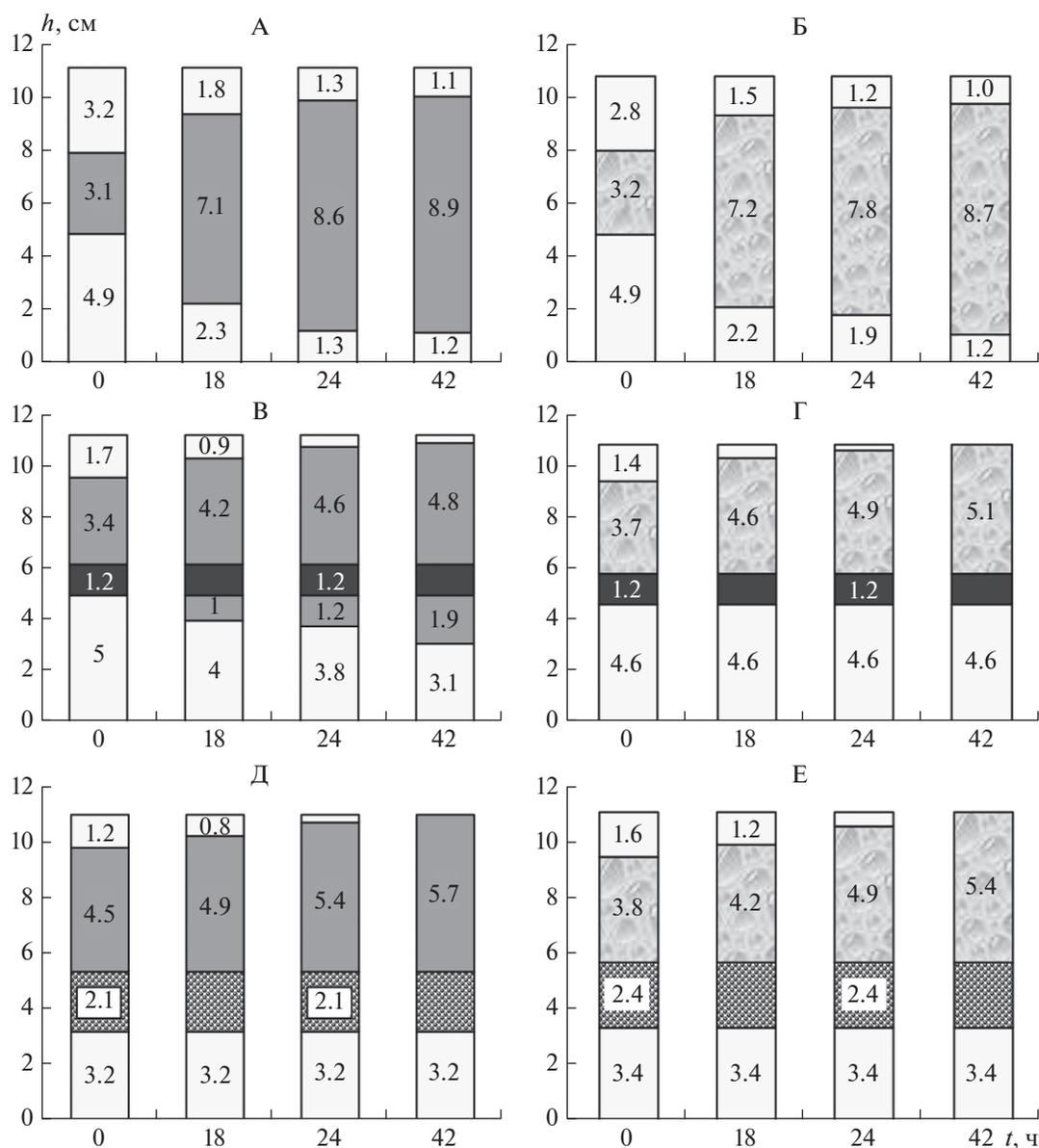


Рис. 5. Динамика капиллярного рассасывания влаги в аридной пылевато-песчаной ареносоли (А) с прослойками геля (Б, Г, Д – заливка фона “капли”), и капиллярными барьерами из торфа (В, Г – черный цвет) и щебня (Д, Е – заливка фона “шары”): А, В, Д – исходная почва, слой торфа, слой щебня, Б, Г, Е – слой с 0.2% гелем, h , см – мощности исходных слоев и последующих фронтов капиллярного рассасывания вверх и вниз из центрального увлажненного слоя почвы (А, В, Д – серый цвет) или почвы с гелем (Б, Г, Е).

слоя геля, реальная равновесная влажность на 50 и 140 сут (16.7–17.9%) фактически совпала с равновесием по ОГХ (16.5–17.8%), установившемся на 140–200 сут по численному эксперименту в Hydrus-1D. Следовательно, для расчета равновесной влагоемкости такого барьера после насыщения (влагозарядки) и свободного оттока воды достаточно просто отложить на ОГХ в качестве секущей высоту его залегания от нижней границы почвенной конструкции, если ее можно зафиксировать. Очевидно для рассмотренного макета – это его перфорированное дно. Для маломощных

конструкций крышного и вертикального озеленения – расстояние от рассматриваемого слоя до основания конструкции. Для слоистых конструкций для газонов с совершенными капиллярными барьерами в виде грубодисперсных или гидрофобных экранов – расстояние до поверхности этих экранов. Программа Hydrus-1D в этом случае не в состоянии просчитать всю систему слоев, поскольку ОГХ для щебня или гидрофобных материалов не существует, но можно разделить вычисления для системы горизонтов над экраном со свободным оттоком (условие seepage face) на

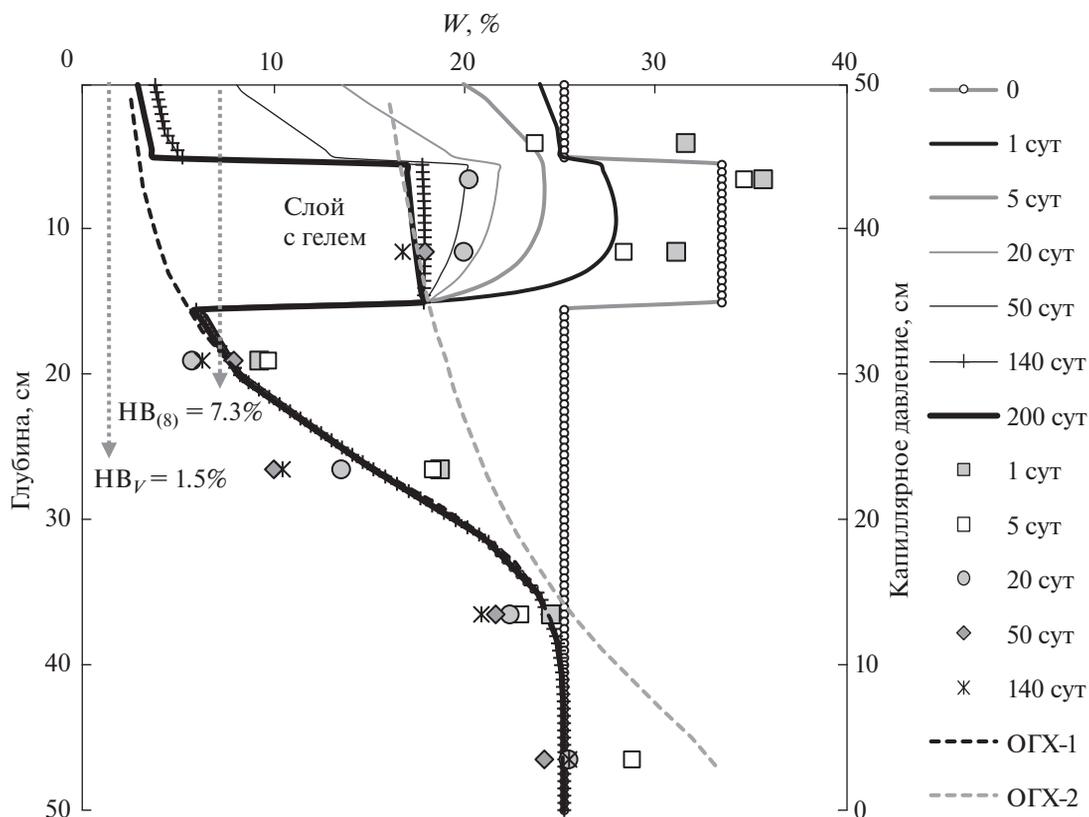


Рис. 6. Динамика влажности в макете почвенной конструкции с кварцевым песком и слоем его композиции с акриловым гидрогелем. Символы – экспериментальные данные, линии – компьютерное моделирование в Hydrus-1D с коэффициентами фильтрации песка 254 см/сут и слоя с гелем 2.9 см/сут, условия нулевого потока на верхней и seepage face – на нижней границе; ОГХ_{1,2} – кривые водоудерживания песка и его композиции с гелем; HB_v и $HB_{(8)}$ – оценка наименьшей влагоемкости песка по ОГХ методом Воронина и по формуле (8).

нижней границе и для толщи под экраном со входом на ее поверхность стекающей из экрана воды.

Как показывают аналогичные технологические расчеты, слоистые конструкции с капиллярными барьерами в виде небольших (10 см) слоев с синтетическими гелевыми структурами или природными почвоулучшителями на основе механоактивированного торфа способны увеличивать в 1.5–2 раза равновесный запас доступной влаги в грубо-текстурных почвах и пролонгировать устойчивое корневое питание на 1–2 недели при минимальных непродуктивных потерях влаги [6, 7]. В аридных условиях поливного земледелия это означает возможность 1.5–2-кратной экономии дефицитных водных ресурсов, а для озеленения городских гумидных ландшафтов – поддержание высокопродуктивной газонной растительности, устойчивой к периодическим летним засухам [6, 7]. Размещение на оптимальной глубине (см. расчет H_w) совершенного капиллярного барьера из грубодисперсного материала или гидрофобизация подпочвы дают дополнительный эффект аккумуляции (“подвешивания”) влаги в верхней корнеобитаемой толще

и ее надежную защиту от вторичного засоления и техногенного загрязнения [7].

Заключительная иллюстрация подтверждает эти теоретические результаты на практике тестирования предложенных почвенных конструкций с капиллярными барьерами обоих типов (рис. 7). Запасы влаги после влагозарядки в конструкциях с барьерами были в 1.2–1.9 раза больше по сравнению с контролем (вариант 1), и это превышение сохранялось на протяжении последующего двухнедельного периода. Минимальное превышение (1.2–1.3 раза) отмечается в вариантах с обработкой подпочвы метилсиликоновым гидрофобизатором (2) и со щебнистым экраном (5), отделяющим подпочву от корнеобитаемого рабочего слоя. Вероятно, здесь могли формироваться 3D-преимущественные потоки, не учитываемые при одномерном технологическом моделировании слоистых систем [9, 22]. Формирование несовершенных барьеров в корнеобитаемом слое на основе гидрогеля (3) и механоактивированного торфа (4) увеличивало влагоемкость в 1.4–1.6 раза, а их комбинация со щебнистым экраном (совершенным барьером) – в 1.5–1.8(1.9) раз (вари-

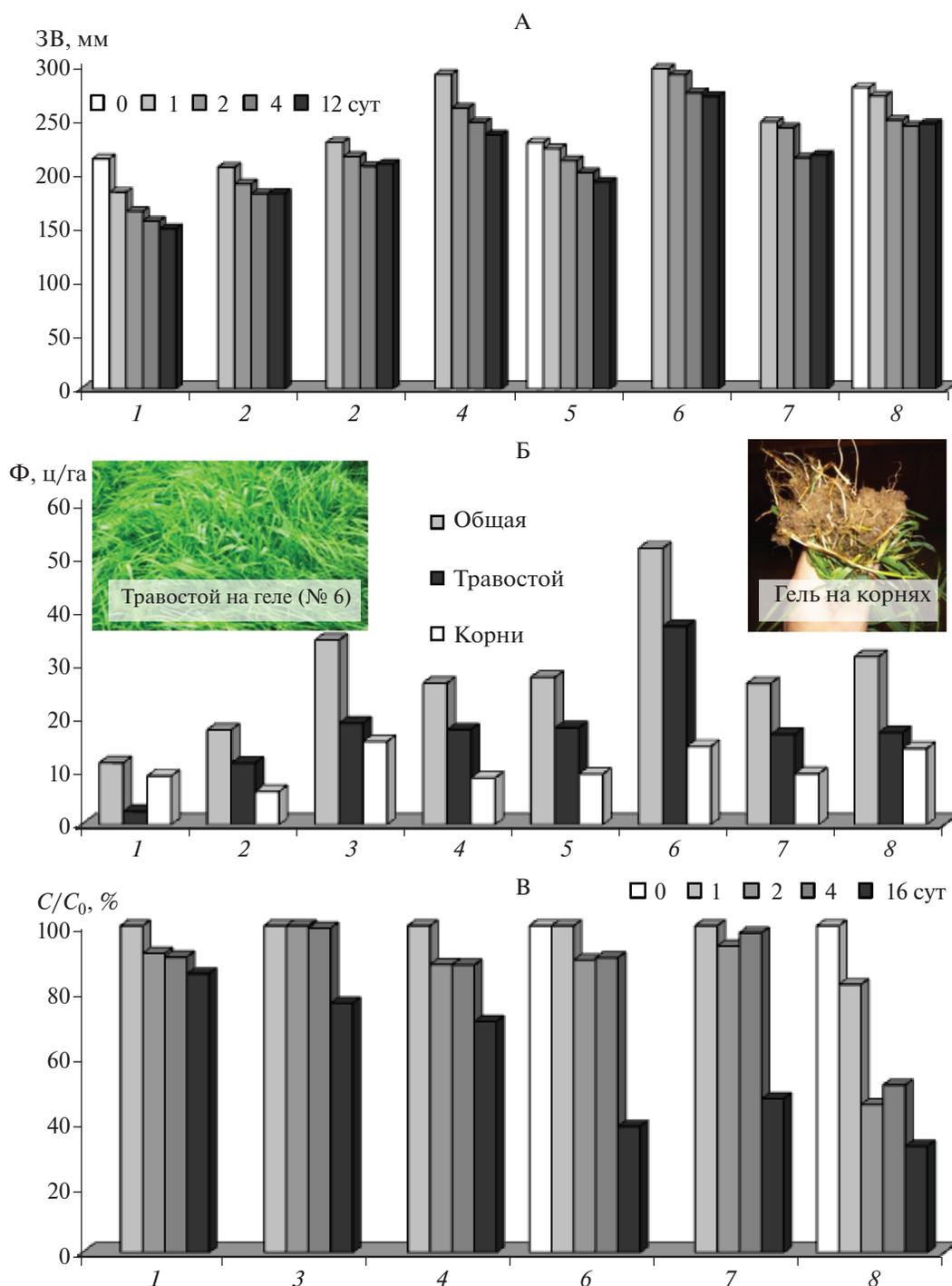


Рис. 7. Мониторинг запасов влаги (ЗВ), фитомассы газона (Ф) и относительного содержания солей-электролитов ($C/C_0, \%$) в полевых испытаниях почвенных конструкций с капиллярными барьерами. Обозначения: 1 – контроль ((урбо)дерново-подзолистая супесчаная почва), 2 – обработка подпочвы силиконовым гидрофобизатором 0.2%; 3, 4 – 10-сантиметровые слои акрилового гидрогеля (0.2%) и торфа (100%), 5 – 10-сантиметровый экран из щебня в подпочве; 6, 7 – 10-сантиметровые слои геля (0.2%) и торфа (100%) над экраном, 8 – два слоя 100% торфа по 10 см над экраном; 3, 4 – несовершенные, 5–8 – совершенные капиллярные барьеры.

анты 6–8), подтверждая прогнозные технологические расчеты (рис. 7, А). В хорошем соответствии с запасами продуктивной влаги происходило формирование фитомассы универсальной газонной тра-

восмеси с 1.5–3 (4.5) превышением необработанного контроля на участках с капиллярными барьерами к концу 40-дневного эксперимента (рис. 7, Б). Наиболее высокие показатели (35–50 ц/га) достиг-

нуты в вариантах с гидрогелем (3, 6) и двумя слоями торфа над щелнистым экраном (8). Причем гель стимулировал рост как надземной, так и подземной фитомассы, формируя в ризосфере своеобразную биокапсулу, пронизанную корнями, напоподобие микоризы. Варианты с одним торфяным слоем (4), щелнистым экраном (5), и их комбинация (7) давали фактически идентичные результаты по общей фитомассе в 26–27 ц/га, вдвое превышающие необработанный контроль. Полторократное превышение было достигнуто в самом простом с технологической точки зрения варианте обработки гидрофобизатором (7). Транспирационные коэффициенты на участках с почвенными конструкциями варьировали в интервале 522–1155 ед. с осредненной за весь период эксперимента величиной 782 ± 48 при $p = 0.05$.

Анализ солевого состояния выявил четкую тенденцию рассоления корнеобитаемой толщи, причем наиболее эффективными, как и ожидалось, оказались конструкции (6–8) с совершенным барьером в виде щелнистого экрана (рис. 7, В). Уже за небольшой срок (0.5 мес.) в условиях одного влагозарядкового полива и последующих естественных осадков в них удалось достичь 60% снижения исходного уровня засоления с 6 до 1.2–1.5 дСм/м электропроводности, что соответствует незасоленной почве по принятым нормативам [7, 19]. Принцип действия таких конструкций очевиден – вынос с поливными водами или осадками легко растворимых солей-электролитов вниз за пределы грубодисперсного экрана и невозможность их возврата назад к поверхности почвы при обратных потоках почвенной влаги к испаряющей поверхности из-за разрушения барьером капиллярной сплошности [5]. Тот же механизм будет работать и для борьбы с техногенным загрязнением водорастворимыми формами тяжелых металлов в мегаполисе, причем использование щелчных материалов для конструирования грубодисперсных капиллярных барьеров или расположение за ними дополнительного известкового слоя или катионита позволяет надежно связать эти поллютанты, не допуская их попадания в грунтовые воды.

ВЫВОДЫ

1. Капиллярность в полидисперсных пористых системах почв и грунтов наряду с гранулометрическим составом контролируется плотностью сложения, плотностью твердой фазы, удельным объемом адсорбированной влаги и смачиваемостью.

2. Для учета этих факторов предложена физически обоснованная модель, развивающая классическое уравнение Жюрена, и позволяющая более адекватно проводить прогноз капиллярного подъема как в монодисперсных (гранулометрические фракции), так и в полидисперсных пористых системах.

3. Предложено деление капиллярных барьеров на несовершенные и совершенные с частичным или полным разрывом капиллярности в профиле почвы (почвенной конструкции).

4. Полевое тестирование инновационных почвенных конструкций для городского озеленения с капиллярными барьерами обоих типов и их комбинацией подтвердило возможность 1.5–2-кратного увеличения их влагоемкости и повышения продуктивности зеленых газонов при надежной защите растительного слоя от водорастворимых поллютантов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Теоретические разработки, моделирование капиллярных эффектов, дизайн и тестирование почвенных конструкций были поддержаны грантом РФФИ (№ 19-29-05006\19). Н.Б. Садовникова и А.В. Кириченко проводили лабораторный анализ гранулометрического состава и основных гидрофизических функций в рамках госзадания по теме НИР в МГУ: “Физические основы экологических функций почв: технологии мониторинга, прогноза и управления”.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белюченко И.С., Смагин А.В., Попок Л.Б., Попок Л.Е. Анализ данных и математическое моделирование в экологии и природопользовании. Краснодар: Изд-во КубГАУ, 2015. 312 с.
2. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв и грунтов. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
3. Нертин С.В., Чудновский А.Ф. Физика почвы. М.: Наука, 1967. 584 с.
4. Роде А.А. Избр. тр. Т. 3. Основы учения о почвенной влаге. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 664 с.
5. Смагин А.В. Молекулярные межфазные взаимодействия газов и паров в почвах. М.: Юстициформ, 2020. 309 с.
6. Смагин А.В. Синтетические гелевые структуры в почвах и почвенных конструкциях. М.: Юстициформ, 2020. 556 с.
7. Смагин А.В. Теория и практика конструирования почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2012. 544 с.
8. Теории и методы физики почв. М.: Гриф и К, 2007. 616 с.
9. Умарова А.Б. Преимущественные потоки влаги в почвах: закономерности формирования и значение в функционировании почв. М.: ГЕОС, 2011. 269 с.
10. Al-Maktoumi A.K., Al-Ismaily S.S., Kacimov A.R., Al-Busaidi H.A., Al-Saqri S.M., Haddabi M.H. Soil substrate as a cascade of capillary barriers for conserving water in a desert environment: lessons learned from arid

- nature // J. Arid Land. 2014. V. 6. № 6. P. 690703.
<https://doi.org/10.1007/s40333-014-0068-7>
11. *de Gennes P.-Gi., Brochard-Wyart F., Quere D.* Capillarity and Wetting Phenomena (Springer-Verlag. N.Y.) 2004. 288 p.
<https://doi.org/10.1007/978-0-387-21656-0>
 12. *Goebel M.O., Bachmann J., Janssens I.A., Reichstein M., Guggenberger G.* Soil water repellency and its implications for organic matter decomposition is there a link to extreme climatic events? // *Global Change Biol.* 2011. V. 17. P. 26402656.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02414.x>
 13. *Fredlund M.D., Fredlund D.G., Wilson G.W.* An equation to represent grain-size distribution // *Can. Geotechnical J.* 2000. V. 37. P. 817827.
 14. *Han J., Zhou Z.* Dynamics of Soil Water Evaporation during Soil Drying: Laboratory Experiment and Numerical Analysis // *Sci. World J.* 2013. ID 240280.
<https://doi.org/10.1155/2013/240280>
 15. *Keen B.A.* The physical properties of the soil. Longmans: Green and Co, London. N.Y. Toronto. 1931.
 16. *Kirkham M.B.* Principles of Soil and Plant Water Relations. N.Y.: Elsevier Acad. Press. 2014. 598 p.
<https://doi.org/10.1016/C2013-0-12871-1>
 17. *Lal R., Shukla M.K.* Principles of Soil Physics. N.Y.-Basel: Ohio St. Univ M. Dekker, Inc. 2005. 716 p.
<https://doi.org/10.1111/j.13652389.2005.0756c.x>
 18. *Loizeau J.L., Arbouille D., Santiago S., Vernet J.P.* Evaluation of wide range laser diffraction grain size analyzer for use with sediments // *Sedimentology.* 1994. V. 41. P. 353361.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1994.tb01410.x>
 19. *Maas E.V., Hoffman G.J.* Crop-salt tolerance evaluation of existing data // *J. Irrig. Drain. Div.* 1977. V. 103. P. 115 134.
 20. *Olorunfemi I.E., Temitope A.O.T.A., Fasinmirin J.T.* Soil Hydrophobicity: An Overview // *J. Sci. Res. Reports.* 2014. V. 3. P. 10031037. ID no. JSRR.2014.001
 21. *Pena-Mendez E.M., Havel J., Patocka J.* Humic substances-compounds of still unknown structure: applications in agriculture, industry, environment, and biomedicine // *J. Appl. Biomed.* 2005. V. 3. P. 1324.
<https://doi.org/10.32725/jab.2005.002>
 22. *Simunek J., van Genuchten M.Th., Sejna M.* The Hydrus software package for simulating two- and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Technical Manual, Version 1.0 // PC Progress. Prague, Czech Republic, 2006. 241 p.
 23. *Smagin A.V.* About Thermodynamic Theory of Water Retention Capacity and Dispersivity of Soils // *Eur. Soil Sci.* 2018. V. 51. P. 782796.
<https://doi.org/10.1134/S1064229318070098>
 24. *Smagin A.V.* Physically based mathematical models of the water vapor sorption by soils // *Eur. Soil Sci.* 2011. V. 44. № 6. P. 659669.
<https://doi.org/10.1134/S1064229311060135>
 25. *Smagin A.V.* Theory and methods of evaluating the physical status of soils // *Eur. Soil Sci.* 2003. V. 36. № 3. P. 301–312.
 26. *Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Nazarova T.V., Kiryushova A.B., Mashika A.V., Eremina A.M.* The effect of organic matter on the water-retention capacity of soils // *Eur. Soil Sci.* 2004. V. 37. P. 267275.
 27. *van Genuchten M.T.* A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1980. V. 44. P. 892898.
 28. *Voronin A.D.* Energy Concept of the Physical State of Soils. // *Eur. Soil Sci.* 1990. V. 23. P. 7–19.
 29. *Weipeng W., Jianli L., Bingzi Z., Jiabao Z., Xiaopeng L., Yifan Y.* Critical evaluation of particle size distribution models using soil data obtained with a laser diffraction method. // *PloS one.* 2015. V. 10. P. 118.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125048>
 30. *Wesseling J.G.* Soil physical data and modeling moisture flow. Al-terra, Wageningen UR, 2009. 178 p.

Capillary Effects in Polydisperse Systems and Their Use in Soil Engineering

A. V. Smagin^{1, 2, 3, *}, N. B. Sadovnikova^{1, 2}, E. A. Belyaeva², A. V. Kirichenko¹, and V. N. Krivtsova¹

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

²Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences, Uspenskoe, Moscow oblast, 143030 Russia

³Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, 117198 Russia

*e-mail: smagin@list.ru

The capillary effect in polydisperse porous systems of soils and sediments is discussed. Its quantitative assessment is based on a new fundamental model of capillary rise depending on the parameters of the dispersion of soil particles, the soil density and the density of its solid phase, wettability and the amount of strongly bound water. In contrast to the well-known Juren's law, the model takes into account particle size distributions and the change in pore size under the influence of soil density. The model adequately predicts the capillary rise both in artificial monodisperse porous systems and in real soils with particle size spectra ranging from 0.006 to 1 mm. The influence of natural and synthetic hydrophobizers on the kinetics and the maximum height of capillary rise was investigated. The results of laboratory and field studies of the efficiency of imperfect (with hydraulic with hydraulic connection) and perfect (with the effect of its rupture) capillary barriers in comparison with predictive modeling in the HYDRUS-1D program are presented. The results obtained are used to evaluate capillarity in soils and to design soil constructions with capillary barriers.

Keywords: soils and sediments, capillary rise, granulometric composition, specific surface area, soil bulk density, water retention curves, hydrophobization, wetting edge angles, capillary barriers