

## ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВ

УДК 631.4

### ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ ФИЗИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА ПОЧВ

© 2021 г. А. В. Смагин<sup>a, b, c, \*</sup>

<sup>a</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

<sup>b</sup>Институт лесоведения РАН, ул. Советская, 21, Московская обл., Успенское, 143030 Россия

<sup>c</sup>Российский университет дружбы народов, ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, 117198 Россия

\*e-mail: smagin@list.ru

Поступила в редакцию 08.02.2021 г.

После доработки 19.03.2021 г.

Принята к публикации 07.04.2021 г.

Физическое качество почвы во многом определяется ее межфазными взаимодействиями при переменном содержании воды. Это обстоятельство позволяет считать кривые водоудерживания почв в виде функций содержания воды и ее термодинамических потенциалов индикаторами физического качества почвы и его динамики. Диаграммы физического качества почв в виде кривых водоудерживания с областями доминирования определенных физических механизмов и сил, отвечающих за взаимодействие физических фаз, получены для горизонтов, сгруппированных по пяти текстурным классам FAO/USDA, на основе базы данных (более 400 образцов) основных типов евразийских почв. Оригинальные инструментальные методы, использующие для удаления воды центробежное, гравитационное и температурное физические поля впервые дали возможность получать термодинамические характеристики водоудерживания во всем диапазоне возможного варьирования потенциала почвенной влаги от 0 до 1 млн Дж/кг. Основным фундаментальным результатом является физически обоснованная методология диагностики предельных (критических) значений содержания почвенной влаги и ее термодинамических потенциалов, разделяющих на диаграммах физического качества почв области доминирования различных форм почвенной влаги, физических сил и механизмов межфазных взаимодействий. Показано значение не капиллярных, поверхностных сил и механизмов, контролирующих водоудерживание и физическое качество почв. Практический интерес представляют результаты определения оптимальных диапазонов содержания влаги для различных по дисперсности и генезису почв Евразии в связи с их почвенно-экологическими и технологическими функциями и сервисами.

*Ключевые слова:* почвенная влага, термодинамический потенциал, капиллярность, расклинивающее давление, удельная поверхность, устойчивость водных пленок, критические параметры водоудерживания, оптимальное содержание влаги в почве

DOI: 10.31857/S0032180X21090094

#### ВВЕДЕНИЕ

Совокупность физических свойств и процессов, прямо или косвенно влияющих на экологические функции, сервисы и технологические операции в почвах природных и антропогенных ландшафтов можно определить как физическое качество почв (ФКП). Наиболее распространенный путь оценки ФКП заключается в изучении отдельных свойств почвы в диапазоне их возможных изменений с последующим группированием в индексы качества с референтной базой экологических нормативов [19, 20, 22, 23, 26]. Альтернативу составляет термодинамический подход к количественному изучению ФКП [3, 11, 16–18, 21, 34]. Поскольку определяющие ФКП свойства и процессы тесно зависят от взаимодействия между

физическими фазами почвы (твердой, жидкой и газовой), а также от изменения их соотношения при переменном содержании воды, термодинамика межфазных взаимодействий позволяет объективно оценивать ФКП, оперируя равновесными характеристиками межфазных взаимодействий, такими как, например, основная гидрофизическая характеристика почвы (ОГХ). В нашей стране наибольшую известность получил термодинамический подход Воронина [3, 42], развиваемый в дальнейшем университетской термодинамической школой МГУ [4, 8, 9, 11, 31, 34, 39]. Его основная идея заключается в объединении термодинамики почвенной влаги с классической концепцией почвенно-гидрологических (почвенно-энергетических) констант – полной, капиллярной (КВ),

наименьшей (**НВ**), максимальной молекулярной (**ММВ**), максимальной адсорбционной (**МАВ**) влагоемкостей и их аналогов. Эти критические (предельно равновесные по [42]) показатели маркируют на ОГХ границы областей доминирования тех или иных категорий почвенной влаги (гравитационной, капиллярной, пленочной, адсорбированной прочносвязанной), физических сил и механизмов формирования водоудерживания, мобильности влаги и ее доступности для растений, динамики порового пространства, реологического, структурного состояния, и ФКП в целом. Индивидуальные для каждой почвы ОГХ, разделенные эмпирическим способом секущих Воронина [3, 42] на такие области, выступают в роли диаграмм ФКП, позволяющих оценивать динамику физических свойств и характеристик почвы при изменениях содержания в ней влаги. За рубежом известны работы [16–18], использующие для оценки физического качества почвы ОГХ и модель водоудерживания в форме функции ван-Генухтена [41], наклон которой в сингулярной точке перегиба ОГХ в полулогарифмическом масштабе (индекс Декстера) связан эмпирическими уравнениями с наиболее важными для ФКП свойствами и характеристиками почвы.

Несмотря на постоянно растущую востребованность в сравнительных научных исследованиях физических свойств и процессов, в технологических расчетах механической обработки почв, мелиоративных проектов орошения и дренажа, продуктивности агроландшафтов, почвенно-ландшафтного конструирования и рекультивации земель, термодинамическая концепция ФКП остается незавершенной и имеет ряд методологических проблем. Это прежде всего недостаточное физическое обоснование диагностики на ОГХ критических состояний, с которыми в концепции связываются, контролируемые ФКП, смены физических сил и механизмов. Предложенный с этой целью метод секущих [3, 42], остается эмпирическим, не учитывает зависимость межфазных равновесий от мобильных факторов, например, состава и концентрации жидкой фазы почвы, не обоснован экспериментально для грубодисперсных и органогенных почв [31, 34]. Плохо исследованы из-за методических проблем и недостатка экспериментальных данных области ОГХ со средним и низким содержанием воды, где водоудерживающая способность и ФКП во многом контролируются поверхностными силами и механизмами [25, 32, 39, 40]. Автоматическое распространение на эти области капиллярной модели не позволяет объективно и физически-обоснованно описывать водоудерживающую способность и контролируемые ФКП межфазные взаимодействия без учета капиллярных явлений второго рода (расклинивающего давления тонких слоев жидкой фазы по Дерягину) [5, 15]. Нет четкого физического обос-

нования индекса ФКП Декстера [16], как наклона в сингулярной точке рF-кривой (ОГХ в полулогарифмическом масштабе). Очевидно, что реальная сингулярная точка ОГХ и ее аналог в полулогарифмическом масштабе не должны совпадать по значениям. Отсутствуют или неоправданно трудоемки физически-обоснованные методы определения технологически- и экологически-важного параметра ММВ или его аналога – влажности разрыва капиллярной связи (**ВРК**), при котором происходит смена капиллярных (объемных) сил и механизмов водоудерживания и формирования ФКП на поверхностные, связанные со свободной поверхностной энергией полидисперсных пористых систем. Отсутствуют физически-обоснованные градации ФКП в зависимости от содержания почвенной влаги в связи с основными экологическими функциями почвы (продукционной, биодеструкторной, геостабилизационной, гидрологической, газовой) и мониторинговыми, удобными для практического использования и вместе с тем универсальными для всех почв показателями [9, 23].

Эти и некоторые сопутствующие методологические проблемы определили цель данного исследования как дальнейшую разработку термодинамической концепции ФКП на базе современных представлений о капиллярных и поверхностных механизмах межфазных взаимодействий в полидисперсных физических системах на примере разных по генетическим типам и дисперсности евразийских почв. Основные задачи исследования включали: получение ОГХ и сопутствующих термодинамических характеристик межфазных взаимодействий евразийских почв на единой методической основе во всем диапазоне варьирования содержания почвенной влаги; альтернативную существующим эмпирическим методам физически-обоснованную диагностику критических (или предельно-равновесных по [42]) состояний для смен физических сил и механизмов формирования ФКП по среднестатистическим ОГХ; скейлинг критических точек и получение градаций безразмерного индекса относительного содержания влаги как базового показателя ФКП в связи с основными почвенно-экологическими функциями и механической обработкой почвы.

Теоретический анализ физических сил и механизмов межфазных взаимодействий и использование новых физически-обоснованных моделей для диагностики областей их проявления на ОГХ-диаграммах ФКП определили фундаментальную новизну исследования. Использование комбинации тихоходного (100–500 об./мин), высокоскоростного (до 12–13 тыс. об./мин) центрифугирования и температурной десорбции воды впервые позволило оценить термодинамику водоудерживания во всем диапазоне возможного варьирования потенциала воды в почвах от 0 до 1 МДж/кг. Основной практический интерес представляют

выявленные с помощью анализа ОГХ диапазоны оптимального для почвенно-экологических функций и технологических операций содержания влаги в относительных единицах влажности, нормированной полной влагоемкостью ( $W/W_s$ ) для пяти групп основных текстурных классов FAO/USDA почв Евразии.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В работе анализировалась представительная (>400 образцов) база данных (БД) термодинамических характеристик полного, матричного (капиллярно-сорбционного), осмотического потенциалов почвенной влаги, базального дыхания как функций от содержания влаги, а также сопутствующих показателей, плотности почвы и ее твердой фазы, гранулометрического состава, удельной поверхности, высоты капиллярного подъема для евразийских почв, впервые опубликованная в [31] и дополненная последующими материалами [8, 9, 33, 31–34, 36, 37, 39]. БД включала основные типы евразийских почв: ареносоли и бурые полупустынные (Arenosols, Xerosols), подзолистые, глееподзолистые, дерново-подзолистые, аллювиальные, серые и бурые лесные почвы (Podzols, Gleyic Podzoluvisols, Podzoluvisols, Fluvisols, Phaeozems, Cambisols,) каштановые, черноземные почвы, солонцы, солончаки, солоды (Kastanozems, Chernozems, Solonetz, Solonchaks, Solodic Planosols), красноземы, желтоземы, вертисоли (Luvisols, Vertisols), глинистые минералы, органогенные почвы (Histosols), сильнонабухающие полимерные гидрогели в 0.1–0.3% композициях с минеральными почвами разного гранулометрического состава и генезиса.

ОГХ в диапазоне потенциалов (давлений) 0–3030(3700) Дж/кг (кПа) были получены методом центрифугирования в нашей модификации [34], учитывающей действие гравитационного поля на низких (100–500 об./мин) скоростях, с использованием лабораторных центрифуг ЦЛН-16 и Hettich Universal 320, российского и германского производств. После заключительной стадии высокоскоростного (12–13 тыс. об./мин) центрифугирования образцы переносились в стеклянные бюксы, доводились до воздушно-сухого состояния и помещались для последующей поэтапной сушки в интервале от 30 до 105°C с шагом 10°C в сушильный шкаф KD 200 (КНР) с контролем равновесия на каждой стадии сушки по постоянству массы образца [35]. С помощью такой дифференциальной термодесорбции воды оценивались значения ее потенциала вплоть до 1 МДж/кг синхронно с оценкой равновесной влажности и удельной поверхности образцов, согласно [35]. Расчет потенциала воды в термодинамическом резервуаре лаборатории с постоянными в течение опыта величинами относительного давления паров воды ( $f$ ) и

температуры ( $T_r$ ) осуществлялся в зависимости от переменной температуры сушильного шкафа ( $T$ ) по термодинамическому уравнению [35]:

$$\Psi = Q - mT, \quad m = \frac{Q}{T_r} - R \frac{\ln(f)}{M}, \quad (1)$$

где  $Q = 2401 \pm 3$  кДж/кг – удельная теплота фазового перехода вода/пар в интервале температур 0–100°C;  $T$  – температура сушильного шкафа, К;  $M = 0.018$  кг/моль – молекулярная масса воды;  $R = 8.314$  Дж/(моль К) – универсальная газовая константа.

Для альтернативной оценки полного термодинамического потенциала воды использовали динамические сорбционные методы [10, 33] и метод криоскопии в модификации [10] с автоматической регистрацией логгерами DS1923 (США). Аппроксимация взаимосвязей влажности с полным и матричным термодинамическими потенциалами осуществлялась моделями Кэмпбелла [14], ван-Генухтена [41], и расклинивающего давления в виде адаптированного для полидисперсных пористых систем почв и грунтов фундаментального уравнения Дерягина [15, 34, 39]. По алгебраической разности между абсолютными значениями полного и матричного потенциалов при данном содержании влаги определялось осмотическое давление (потенциал) почвенного раствора, согласно термодинамическому правилу аддитивности [3].

Гранулометрический состав определялся классическим методом седиментации [2, 21] и методом лазерной дифракции [24] с использованием анализатора размеров частиц Microtrac S-3000 (США). Капиллярный подъем воды в лабораторных экспериментах изучался методом почвенных колонн с оценкой кинетики процесса по модифицированному закону Дарси [21] и последующим расчетом предельной (равновесной) высоты капиллярного подъема по [9]. Определение микробиологической активности в зависимости от температуры и влажности производилось синхронно с оценкой водоудерживания на разных стадиях центрифугирования модифицированным методом инкубации [9, 36]. Модификация учитывала межфазные взаимодействия выделяющегося  $\text{CO}_2$  с твердой и жидкой фазами почвы, для чего образец после инкубации нагревался в течение 1–2 мин в микроволновой печи для термодесорбции и термодегазации  $\text{CO}_2$ , удерживаемого твердой и жидкой фазами.

Наряду с экспериментальными данными, в исследовании были проанализированы и обобщены монографические материалы [1–4, 7, 11–13] по гидрофизике и технологическим свойствам основных типов почв Евразии в связи с проблемой количественной оценки их ФКП. Для компьютерной статистической и математической обра-

ботки материалов, аппроксимации экспериментальных данных нелинейными моделями [14, 15, 41] использовалась программа S-Plot 11 по руководству [1].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Теоретические предпосылки и модели.** В связи с изложенной во введении основной идеей термодинамической концепции ФКП на ОГХ-диаграммах необходимо выделить области доминирования тех или иных физических сил и механизмов межфазных взаимодействий, от которых зависят водоудерживание и ФКП в целом. Предполагается, что смена сил и механизмов осуществляется по мере изменения содержания почвенной влаги ( $W$ ) в окрестности критических точек (НВ, ММВ (ВРК), МАВ), положение которых на кривых ОГХ позволяют определить эмпирические методы “секущих” [27, 28, 42], связывающие критические значения влажности и давления влаги в почве.

Для начала определим границы всего диапазона варьирования содержания и термодинамического потенциала воды в почве. Верхняя граница диапазона задается величиной полной влагоемкости или влажности насыщения почвы ( $W_s$ ). В общем случае это условная величина, поскольку для верхнего слоя тонкодисперсных, свободно набухающих почв нет какого-то четкого предела по объему, и добавление воды просто переводит постепенно связную пористую почву (грунт) в текучую пасту, а потом – суспензию, что нередко бывает в природе и вызывает водную эрозию и геокатастрофические явления [4, 8]. Однако для жестких (грубодисперсных) почв и любых почв, находящихся под собственным литологическим давлением, величина  $W_s$  может быть фиксированной, и тогда ее определяет известное уравнение  $W_s = \rho_b^{-1} - \rho_s^{-1}$  по данным о плотностях сложения ( $\rho_b$ ) и твердой фазы ( $\rho_s$ ) почвы [11]. Потенциал (давление) почвенной влаги на ОГХ при этом принимается равным нулю, хотя это справедливо лишь по отношению к его каркасной (матричной) составляющей.

Нижняя граница задается состоянием условно “нулевой” влажности, достигаемым стандартной для почв и грунтов сушкой при 105°C. Проблема неполного удаления воды при такой температуре для почвенных коллоидов обсуждается в [35], и здесь мы не будем на ней останавливаться. Отметим другое, что в условном состоянии  $W = 0$ , потенциал воды не является неопределенной величиной, как это предполагается в подавляющем большинстве моделей изотерм сорбции воды [33] и ОГХ, включая “стандартную” модель ван-Генухтена [41]. Его легко определить по фундаментальному уравнению (1) при  $T = 378$  К (105°C). Для относительной влажности воздуха ( $f = 0.2–0.3$ ) и темпера-

туры окружающего термодинамического резервуара лаборатории ( $T_r = 291–293$  К) эта величина по модулю достигает 0.89–1.0 МДж/кг. Работа [25] приводит близкую эмпирическую оценку в форме критерия Грюнвельта-Гранта (около 0.8 МДж/кг). Значит, область абсолютных значений потенциала воды порядка 1 МДж/кг есть область сходимости всех кривых ОГХ при условно нулевой влажности почвы. Данный методологический результат представляет интерес для моделирования ОГХ во всем диапазоне содержания влаги и для оценки по ОГХ такого важного показателя ФКП как дисперсность (удельная поверхность ( $S_0$ )) почвы. С этой целью используется фундаментальная модель расклинивающего давления по Дерягину для аппроксимации линейного в полулогарифмических координатах участка кривых ОГХ, берущего начало из области их сходимости [34, 39]. Работы [31–33] предлагают несколько теоретических формул для оценки  $S_0$  по наклону прямолинейного участка ОГХ, полученных из условий устойчивости симметричных пленок влаги, разделяющих плоскопараллельные тонкодисперсные частицы, среди которых наиболее тесную корреляцию со стандартной оценкой по теории БЭТ дает формула:

$$S_0 = \frac{1}{br_0\rho_l} \sqrt{2 \exp(-2)} \approx \frac{1}{2br_0\rho_l}, \quad (2)$$

где  $r_0 = 1.38 \times 10^{-10}$ , м и  $\rho_l$ , кг/м<sup>3</sup> – молекулярный кристаллохимический радиус и плотность воды,  $b$ , кг/кг – наклон ОГХ в модели расклинивающего давления  $|P| = a \exp(-bW)$ ,  $a$ ,  $b$  – физически обоснованные параметры [34, 39].

Определив полный диапазон варьирования содержания влаги и ее термодинамического потенциала в почве, перейдем к задаче физически обоснованной оценки на ОГХ границ между категориями почвенной влаги, основными силами и механизмами, контролирующими в зависимости от влажности ФКП. Поскольку ОГХ определяется преимущественно иссушением (гистерезис ОГХ пока не учитывается в термодинамической концепции ФКП), и этот процесс доминирует во времени в сравнении с краткосрочными осадками и поливами, резонно начать теоретический анализ от состояния насыщения почвы (полной влагоемкости). Вход воздуха в насыщенную (двухфазную) систему приводит к появлению капиллярных сил с отрицательной кривизной менисков при максимальном содержании удерживаемой почвой капиллярной влаги в состоянии КВ. Воронин [3, 42] ставит в соответствие такому состоянию предел текучести почвы по Аттербергу и выделяет его на ОГХ по единой для всех почв величине потенциала (давления) 14.7 Дж/кг (кПа), что на наш взгляд, маловероятно, так как под разряжением 14.7 кПа (гравитационным давлением в 1.5 м) в груботекстурных почвах будет удаляться практи-

чески вся капиллярная влага. Это также противоречит известным данным о варьировании давления входа воздуха ( $P_e$ ) в зависимости от текстуры почв, согласно [14]. Исходя из физического смысла состояния КВ, предлагается способ его диагностики по ОГХ с использованием стандартной модели ван-Генухтена непосредственно по модулю давлению входа воздуха:

$$P_e = 1/a; \text{ КВ} = (W_s - W_r) \times 2^{-m} + W_r, \quad (3)$$

либо по сингулярной точке ОГХ с координатами [9]:

$$P_{\text{КВ}} = P_e (m)^{(1-m)}; \quad (4)$$

$$\text{КВ} = (W_s - W_r)(m + 1)^{-m} + W_r,$$

где  $\alpha$ ,  $\text{кПа}^{-1}$ ,  $W_r$ ,  $m$ ,  $n$  – эмпирические параметры функции ван-Генухтена с условием Муалема:  $m = 1 - 1/n$  [41].

Следующее состояние по физическому смыслу характеризует предел развития собственно капиллярных сил, удерживающих воду в почве против сил гравитации, стремящихся ее удалить. По прошествии этого состояния с уменьшением влажности начинает проявляться совместное действие капиллярных и поверхностных сил, поэтому Воронин [3] называл его максимальной капиллярно-сорбционной влагоемкостью. В термодинамической концепции ФКП ему соответствует наименьшая (в англоязычной литературе – полевая) влагоемкость, которую можно определить по кривым ОГХ методом Ричардса-Уивера [28] с эмпирической секущей в виде постоянного модуля капиллярного давления  $P_{\text{НВ}} = 33.3 \text{ кПа}$  или способом Воронина по эмпирической секущей в форме зависимости  $\lg|P_{\text{НВ}}| = 1.17 + W$ . Из тех же соображений, что и в случае КВ, в груботекстурных почвах можно ожидать сильное занижение оценки НВ обоими способами. Физический смысл состояния НВ как равновесия капиллярных сил и гравитации в однородной почве позволяет предложить альтернативный способ оценки НВ по секущим в виде предельной высоты капиллярного подъема [9]. Это фиксированная для каждой почвы, конечная величина, варьирующая от нескольких сантиметров (дециметров) в груботекстурных почвах и до 3–4 (6) м в тонкодисперсных почвах и грунтах, включая лёссы [4, 7, 13]. В полидисперсных пористых системах почв и грунтов капиллярный подъем определяется факторами дисперсности (удельной поверхности скелетной части почвенных частиц,  $S_{sc}$ ), и свободной пористостью за вычетом прочносвязанной неподвижной влаги ( $W_a$ ), согласно фундаментальной формуле [9]:

$$H_c = \frac{\sigma_{1/g} S_{sc} \rho_b \cos(\Theta)}{\rho_l g [1 - \rho_b/\rho_s - \rho_b W_a/\rho_l]}, \quad (5)$$

где  $H_c$ , м – предельная высота капиллярного подъема,  $g$ ,  $\text{м/с}^2$  – ускорение силы тяжести,  $\Theta$  – краевой угол смачивания. Параметр  $S_{sc}$  легко определяется численным интегрированием гранулометрических распределений [9]. Эмпирическая связь между  $H_c$  и равновесной влажностью в верхней части капиллярной каймы, полученная для 243 образцов почв Евразии разных генетических типов генезиса и текстурных классов представлена на рис. 1 в форме эквивалентного капиллярного давления ( $P_c = H_c \rho g$  или  $P_c$ ,  $[\text{кПа}] \approx H_c$ ,  $[\text{дм}]$ ). Ее нелинейная аппроксимация позволила получить простое уравнение секущей для расчета НВ по ОГХ физически-обоснованным методом по высоте (критическому давлению) капиллярного подъема:

$$H_c, [\text{дм}] = P_c, [\text{кПа}] = 0.15W\%^{1.5}. \quad (6)$$

Одновременно выдвинута гипотеза о соответствии состояния НВ единственной в капиллярной области сингулярной точке рF-кривой. В работах [9, 18] независимыми путями получено уравнение для расчета из ОГХ дифференциальных распределений объемов пор ( $V$ ) по размерам ( $r$ ) с использованием стандартной функции ван-Генухтена, имеющее вид:

$$dV(r)/d \ln(r) = (n - 1)(W_s - W_r) \rho_b \times \{1 + (aP)^n\}^{-m-1} (aP)^n. \quad (7)$$

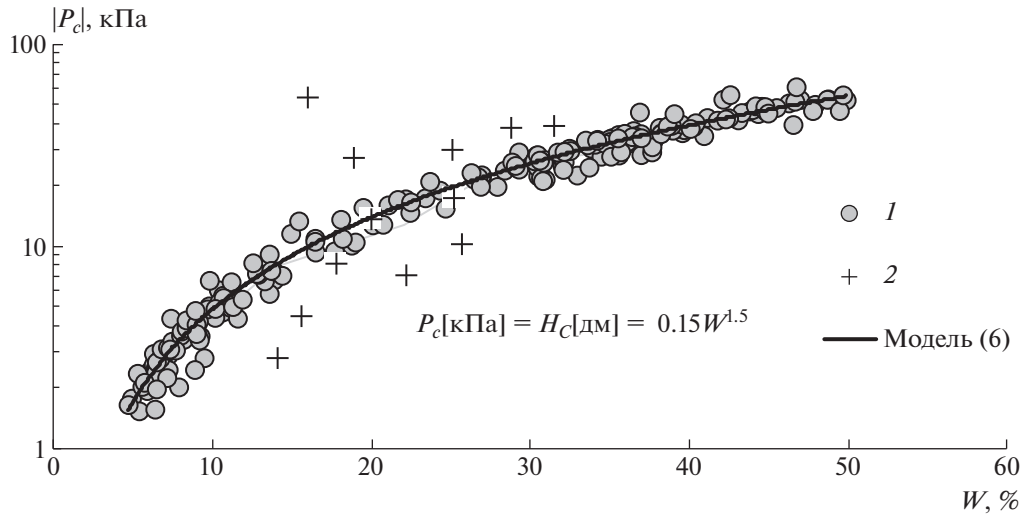
Максимум на таком распределении, указывающий на доминирующие в структуре пористого тела размеры пор, соответствует по определению дифференциальной влагоемкости сингулярной точке ОГХ в полулогарифмическом масштабе или точке перегиба рF-кривой с координатами [16]:

$$P_c = P_e (1/m)^{1/n}; \quad (8)$$

$$W_c = (W_s - W_r)(1 + 1/m)^{-m} + W_r.$$

Помещенные на рис. 1 точки  $P_c$  ( $W_c$ ) для 12-ти текстурных классов FAO/USDA от песков до глин из работы [18] не противоречат полученной зависимости, хотя и дают сильный разброс, что может быть объяснено косвенными методами оценки ОГХ через педотрансферные функции.

Следующей критической точкой ОГХ-диаграммы ФКП является состояние ММВ или его аналога – ВРК, символизирующее равновесие между капиллярными (объемными) и поверхностными силами [3, 34, 42]. При более низкой влажности в почве доминирует пленочная влага с механизмом расклинивающего давления по Дерягину, контролирующим водоудерживание, динамику дисперсности и ФКП в целом. Выдвинута гипотеза о соответствии ММВ (ВРК) и влажности оптимальной для механической обработки почвы (состояния физической спелости) [3, 42]. Диагностика этого состояния по Воронину с помощью



**Рис. 1.** Зависимость предельного капиллярного давления от влажности евразийских почв разного генезиса и дисперсности. Обозначения: 1 – экспериментальная оценка по высоте капиллярного подъема (243 образца); 2 – оценка по точке перегиба педотрансферных rF-кривых для 12-ти текстурных классов FAO/USDA из работы [28].

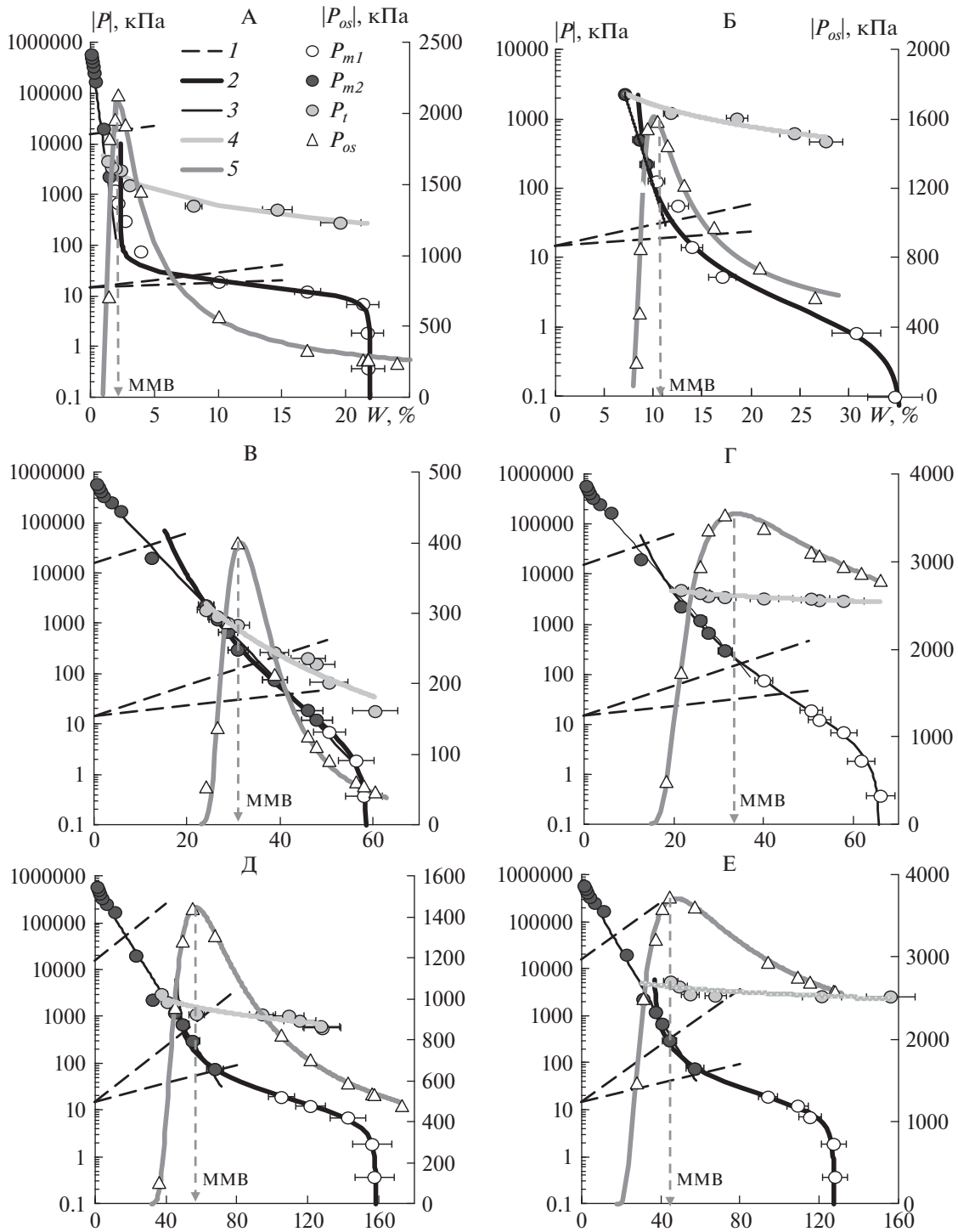
секущей  $\lg|P_{\text{MMB}}| = 1.17 + 3W$  предполагает его зависимость только от твердой фазы с ростом модуля давления влаги по мере утяжеления гранулометрического состава [3]. К тому же его лабораторная оценка по кинетическим кривым сушки [42], априори неравновесного процесса, не представляется обоснованной с позиций равновесной термодинамики. Работы [5, 15, 31, 32, 34] указывают на зависимость энергетики межфазных взаимодействий от мобильных факторов концентрации и состава жидкой фазы, контролирующих ионно-электростатический барьер двойного электрического слоя (ДЭС), устойчивость водных пленок и динамику дисперсности при агрегации тонких частиц. Поэтому для диагностики состояния ММВ (ВРК) предлагается использовать зависимость осмотической составляющей термодинамического потенциала (давления) жидкой фазы почвы от равновесной влажности, имеющую четко выраженный экстремум (максимум) в области ММВ. Уменьшение осмотического давления при более высоких и более низких чем ММВ влажностях объясняется разбавлением почвенного раствора и связыванием молекул воды поверхностными силами вплоть до эффекта “нерастворяющего объема” прочносвязанной адсорбированной влаги (МAB) с условно нулевым осмотическим давлением [7]. Эти представления заложены в физико-статистическую модель [37] для диагностики ММВ (ВРК) в термодинамической концепции ФКП:

$$F = \frac{P_{os}(W)}{P_{os}^{\max}} = \exp \left[ - \left( \frac{\ln \left( \frac{W+k}{\text{ММВ}+k} \right)}{k \ln \left( \frac{W}{\text{МAB}} \right)} \right)^2 \right]. \quad (9)$$

Здесь  $F$  – моделируемая безразмерная функция осмотического потенциала (давления) почвенного раствора  $P_{os}(W)$ , нормированная своим максимальным значением в точке экстремума ( $W = \text{ММВ}$ ), и представленная в форме плотности вероятности концентрации осмотически-активных веществ почвы с переменной влажностью ( $W$ ),  $k$  – эмпирический параметр, отвечающий за ширину пика распределения  $F(W)$ .

На рис. 2 приведены примеры такой оценки для четырех евразийских почв разного гранулометрического состава и генезиса с природным составом жидкой фазы и ее искусственным засолением. С этой целью помимо ОГХ надо получить зависимость полного термодинамического потенциала (давления) от влажности. Разность полного потенциала ( $P_t$ ) и матричного ( $P_m$ ) или различия данных  $P_t$  и  $P_m$ , аппроксимированных моделями Кемпбелла [14], ван-Генухтена [41] в капиллярной области ( $P_{m1}$ ) и моделью раскливающего давления по Дерягину [31, 39] в области пленочной и адсорбированной влаги ( $P_{m2}$ ) дают, согласно правилу аддитивности, осмотическую составляющую водного потенциала:  $P_{os} = P_t - P_m$ . Ее аппроксимация моделью (9) позволяет получить искомую величину ММВ (МAB).

Синхронно в этом анализе на ОГХ-диаграммах ФКП определяется заключительное критическое состояние – МAB, с которым связан переход от пленочной рыхлосвязанной (толстые неустойчивые  $\beta$ -пленки) к прочносвязанной пленочной и адсорбированной влаге (устойчивые тонкие (ньютоновские)  $\alpha$ -пленки и адсорбированная вода) [5, 15]. Метод Воронина [3, 42] оперирует для диагностики этого состояния эмпирической се-



**Рис. 2.** Сопоставление полного  $P_t$ , матричного  $P_m$ , и осмотического  $P_{os}$  давлений (потенциалов) почвенной влаги в евразийских почвах: А – песчаная ареносоля (Дубай); Б – супесчаная полупустынная (Астраханская обл.); В, Г – тяжелосуглинистый чернозем (Липецкая обл.); Д, Е – торфяная низинная почва (Московская обл.); жидкая фаза: В, Д – дистиллят, Г, Е – 0.5 М NaCl; 1 – секущие Воронина [42], 2 – модель ван-Генухтена [41], 3 – модель расклинивающего давления [31], 4 – модель Кэмпбелла [14], 5 – модель (9);  $P_{m1}$  – капиллярные силы,  $P_{m2}$  – поверхностные силы,  $P_{os} = P_t - P_m$ .

**Таблица 1.** Оценка параметров моделей водоудерживания и дисперсности для пяти групп основных текстурных классов евразийских почв

Параметр моделей	I. Пески; пылеватые пески	II. Супеси; легкие суглинки	III. Средние суглинки; пылеватые легкие суглинки; опесчаненные средние суглинки	IV. Пылеватые средние суглинки; тяжелые суглинки	V. Глины; пылеватые глины; глинистые и пылеватато-глинистые тяжелые суглинки
Модель ван-Генухтена [41]: $ P  = \alpha^{-1} \{ \{ (W - W_r) / (W_s - W_r) \}^{1/m} - 1 \}^{1/n}$ , $m = 1 - 1/n$					
$W_s$ , %	22.3 ± 0.5	32.4 ± 0.7	44.1 ± 0.7	60.9 ± 0.8	60.3 ± 0.9
$W_r$ , %	1.0 ± 0.6 ( $p = 0.03$ )	1.3 ± 0.5 ( $p = 0.014$ )	1.6 ± 0.7 ( $p = 0.048$ )	0.0 ± 1.7 ( $p = 1$ )	0.0 ± 3.7 ( $p = 1$ )
$\alpha$ , кПа <sup>-1</sup>	1.33 ± 0.21	1.81 ± 0.44	0.71 ± 0.14	0.29 ± 0.06	0.06 ± 0.02 ( $p = 0.004$ )
$n$	1.85 ± 0.10	1.33 ± 0.03	1.28 ± 0.02	1.20 ± 0.02	1.20 ± 0.04
Модель расклинивающего давления [31, 34, 39]: $ P  = a \exp(-bW)$					
$a$ , Дж/кг (кПа)	$9.3 \times 10^5 \pm 1.1 \times 10^5$	$1.1 \times 10^6 \pm 8.8 \times 10^4$	$1.3 \times 10^6 \pm 2.0 \times 10^5$	$1.6 \times 10^6 \pm 1.4 \times 10^5$	$1.0 \times 10^6 \pm 2.0 \times 10^5$
$b$ , % <sup>-1</sup>	4.73 ± 0.09	1.39 ± 0.02	0.71 ± 0.01	0.34 ± 0.03	0.22 ± 0.04
$S_0$ , м <sup>2</sup> /г	7.7 ± 1.4	26.2 ± 3.1	50.9 ± 9.6	107.4 ± 10.5	162.9 ± 20.5
$A_G$ , Дж	$3.7 \times 10^{-19} \pm 2.5 \times 10^{-20}$	$4.3 \times 10^{-19} \pm 2.0 \times 10^{-20}$	$5.2 \times 10^{-19} \pm 4.6 \times 10^{-20}$	$6.3 \times 10^{-19} \pm 3.4 \times 10^{-20}$	$4.0 \times 10^{-19} \pm 4.9 \times 10^{-20}$

Примечание.  $p$  – уровень значимости. Если он не указан в скобках, то  $p < 0.001$ ;  $\pm$  здесь и далее обозначает соответствующие доверительные интервалы.

кушей  $|\lg|P_{\text{МАВ}}| = 4.2 + 3W$ . Альтернативный и наиболее простой физически-обоснованный способ, помимо использования модели (9), – диагностика МАВ по критерию потоковой устойчивости пленок, который для баланса молекулярных (дисперсионных) сил по Гамакеру-Лифшицу, ионно-электростатических и структурных сил расклинивающего давления по Дерягину имеет простое выражение для критической толщины пленки ( $h_{cr}$ ) и соответствующего ей критического содержания влаги (МАВ) [34]:

$$\text{МАВ} = S_0 \rho_l h_{cr} = 3/b, \quad (10)$$

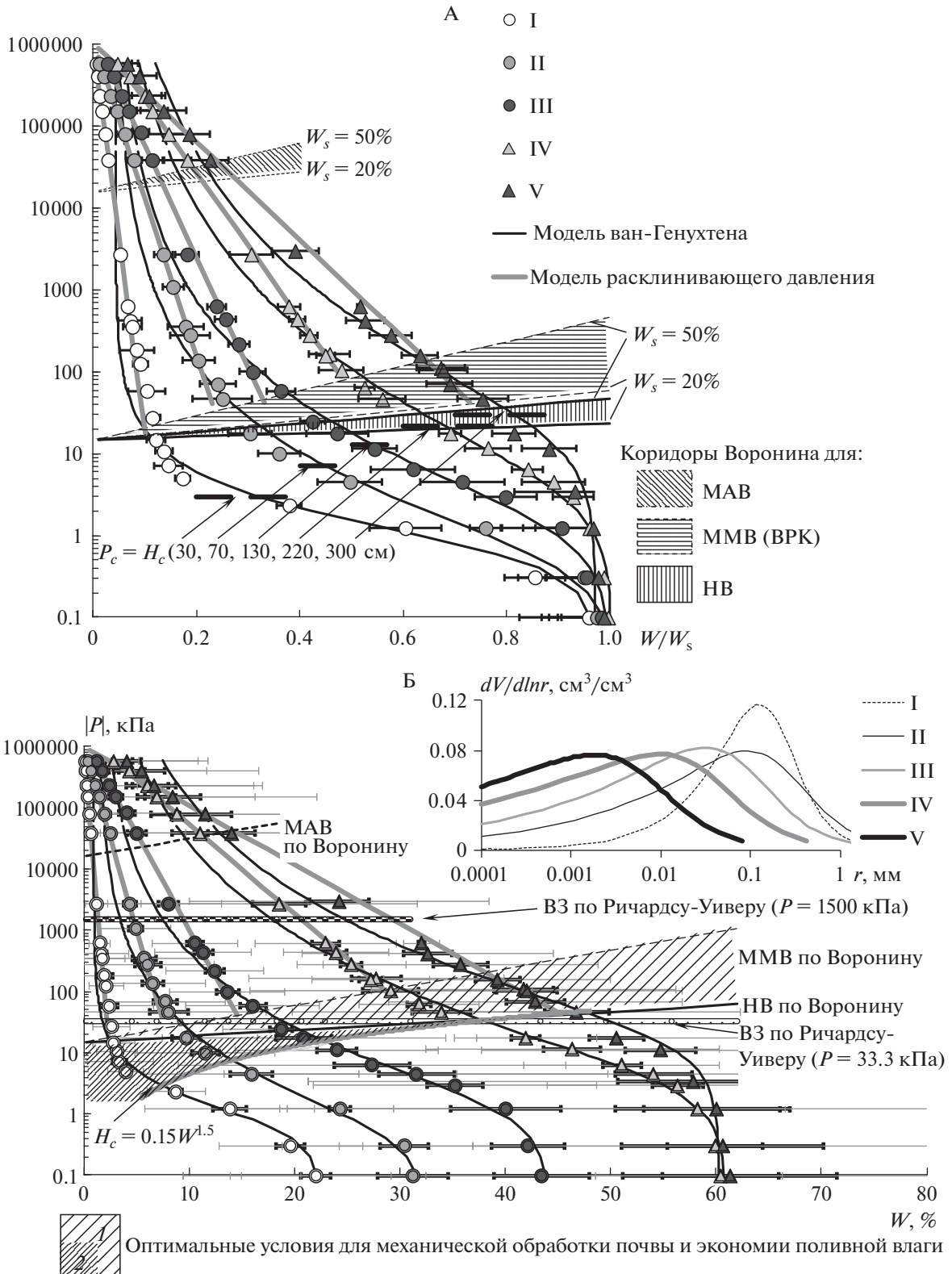
где  $S_0$ , м<sup>2</sup>/кг – дисперсность,  $b$ , кг/кг – показатель наклона ОГХ по экспоненциальной модели расклинивающего давления (см. формулу (2)).

Завершая теоретическую часть, выделим еще одну характерную точку на ОГХ-диаграммах ФКП – влажность завядания (**ВЗ**). Согласно Ричардсу-Уиверу [27], для ее диагностики следует использовать единое для всех почв и грунтов значение потенциала (давления) воды по модулю равное  $|P_{\text{ВЗ}}| = 1500$  кПа. Выдвинутая в [42] гипотеза о связи ВЗ с дисперсностью (гранулометрическим составом почвы) и приведенное эмпирическое уравнение Капиноса  $|\lg|P_{\text{ВЗ}}| = 1.17 + 15W$  не представляются адекватными реальности, по-

скольку в груботекстурных почвах при 5–10% влажности такой расчет дает абсолютные значения потенциалов ВЗ в 100–500 Дж/кг в 5–25 раз меньше известных величин предельного корневого потенциала культурных растений (1000–2500 Дж/кг). Поэтому, оставляя попытки придать важной для ФКП константе ВЗ какой-либо физический смысл, будем использовать эмпирическую диагностику [27] ( $\text{ВЗ}_{1500}$ ) и ее корректировку по [29]:  $\text{ВЗ} = 0.857 + 0.96\text{ВЗ}_{1500}$ .

**Экспериментальные результаты, полученные на основе БД евразийских почв, и их сравнительный анализ.** Диаграмма ФКП (рис. 3, А) объединяет скейлинговые кривые ОГХ по пяти группам основных текстурных классов FAO/USDA разных типов почв Евразии после их статистической обработки. Скейлинг осуществлялся посредством нормирования влажности почвы ее максимальным содержанием ( $W_s$ ) в состоянии насыщения (полной влагоемкости). Среднестатистические параметры аппроксимации экспериментальных данных ОГХ моделями ван-Генухтена [41] и расклинивающего давления [31–35, 39] моделей приведены в табл. 1. В ряду I → V текстурных классов выявлены общие тенденции статистически-значимого увеличения параметров  $W_s$ ,  $n$  и понижения –  $\alpha$ ,  $b$  рассматриваемых моделей ОГХ. Наименее





**Рис. 3.** ОГХ-диаграммы физического качества евразийских почв различного генезиса и дисперсности. Обозначения: А – масштабирование с использованием полной влагоемкости ( $W/W_s$ ), Б – развертка скейлинговой диаграммы при типичных значениях полной влагоемкости  $W_s = 23, 32, 44, 61, 62\%$  для пяти текстурных групп – основной рисунок, распределение пор по размерам – врезка; косая штриховка – оптимальные условия для мехобработки почвы и экономии поливной влаги: 1 – оценка по Воронину [42], 2 – оценка по формуле (6).

определенным (статистически не значимым) является параметр остаточной влажности ( $W_r$ ) в модели [41]. Энергетический показатель потенциала поверхности твердой фазы ( $a$ ) в модели [31] менялся мало со значениями порядка 1 млн Дж/кг, соответствующими потенциалу в состоянии условно “нулевой” влажности (формула (1)). Для развертки скейлинговой диаграммы были использованы характерные для исследуемых I–V текстурных групп классов величины  $W_s = 23; 32; 44; 61; 62\%$  (рис. 3, Б). Горизонтальные планки погрешностей на диаграммах представляют результаты варьирования влажности при осреднении экспериментальных данных ОГХ в форме стандартных отклонений (тонкие линии) и доверительных интервалов при  $p = 0.05$  (жирные линии) с учетом больших выборок данных (по 80–130 образцов). Характерные области доминирования физических сил и механизмов, контролирующей водоудерживающую способность и ФКП, выделены на ОГХ-диаграммах по критическим значениям термодинамических потенциалов (давлений) и содержания влаги для предельно равновесных по [42] состояний НВ, ВРК (ММВ), ВЗ, МАВ. На скейлинговой диаграмме (3-А) уравнения секущих Воронина [42] при этом дали коридоры значений НВ, ММВ, МАВ, задаваемые диапазоном  $W_s$  от 20 до 60%.

Сравнительный анализ диаграмм ФКП (рис. 3, А, Б) в ряду от груботекстурных классов (группы I, II – песков, пылеватых песков, супесей) до тонкодисперсных (IV, V группы тяжелых суглинков и глин) выявляет закономерное изменение ОГХ в сторону увеличения влагоемкости и энергии водоудерживания (потенциала воды). Этот результат подтверждается как визуальным сопоставлением смещения кривых ОГХ, так и сравнительным анализом показателей их наклона ( $b$ ) в полулогарифмическом масштабе, отражающего, согласно фундаментальной формуле (2), дисперсность почвы (эффективную удельную поверхность  $S_0$ ). Дисперсность варьирует от  $7.7 \pm 1.4 \text{ м}^2/\text{г}$  в группе I (пески) до  $162.9 \pm 20.5 \text{ м}^2/\text{г}$  в последней группе V, включающей пылевато-глинистые тяжелые суглинки и глины. Отражающие вклад молекулярных (дисперсионных) сил, обобщенные константы Гамакера ( $A_G$ ) варьировали мало со значениями  $3\text{--}6 \times 10^{-19}$  Дж, близкими к известным оценкам для пленок на кварце [5]. Увеличение дисперсности и, следовательно, поверхностной энергии приводит к расширению вклада поверхностных физических механизмов и сил водоудерживания, что визуально отражается расширением линейного участка ОГХ, описываемого фундаментальной моделью расклинивающего давления [34, 39]. Если в песках такой диапазон ограничен давлением почвенной влаги  $|P| \gg 1000$  кПа и относительной влажностью не более  $0.1 W_s$ , то в тонко-

дисперсных почвах (группы IV, V) он расширяется до абсолютных значений давления воды  $>10\text{--}100$  кПа при влажности  $0.6\text{--}0.85 W_s$ , то есть основного количества воды в почве. Этот важный результат указывает на ограниченность зоны действия традиционной капиллярной модели водоудерживания при оценке ФКП, а также на необходимость ее дополнения другими механизмами (моделями), отражающими действие поверхностных сил.

Сравнительный анализ параметров критических (предельно-равновесных по Воронину [42]) показателей ФКП дает следующие результаты (рис. 3, табл. 2). Показатель КВ варьирует незначительно – от 0.75 до 0.9 единиц  $W/W_s$  при оценке по давлению входа воздуха (3) и от 0.85 до 0.97  $W/W_s$  в случае определения по сингулярности ОГХ (точке перегиба) с использованием формулы (4). Показатель  $P_c = 1/\alpha$  при этом менялся в исследуемом ряду от  $0.75 \pm 0.12$  до  $16.7 \pm 6.4$  кПа, что близко к приводимому в [14] диапазону педотрансферных оценок давления барботирования в почвах в  $0.6\text{--}9$  кПа. Оценка КВ по Воронину [3, 42] дает похожие величины в  $0.7\text{--}0.9 W/W_s$  только для тонкодисперсных классов (IV–V). Во всех остальных случаях она сильно занижает КВ, вплоть до значений  $0.12\text{--}0.36 W/W_s$  в груботекстурных классах I, II, неприемлемых при сравнении с известными литературными данными о КВ (лабораторная оценка методом трубок или по пределу Аттерберга [1, 3]).

Величина наименьшей (полевой) влагоемкости варьирует от  $0.1\text{--}0.3 W/W_s$  в группе I до  $0.7\text{--}0.8 W/W_s$  в группе V исследованных текстурных классов почв Евразии. Оценка НВ по Ричардсу-Уиверу [28] и Воронину [3, 42] занижает результаты для груботекстурных классов (группы I, II песков, пылеватых песков и супесей) по сравнению с величинами  $NV_{\text{real}}$ , определенными для таких почв в полевых экспериментах. Альтернативный метод оценки НВ по предельной высоте капиллярного подъема с использованием секущей ОГХ (6) дает для груботекстурных классов более близкие к полевым измерениям результаты (табл. 2). Несмотря на закономерное уменьшение размеров доминирующих пор в исследуемом ряду текстурных классов (см врезку на рис. 3, Б) и увеличение обратных им абсолютных величин критических давлений  $P_c$  от 1.2 до 79 кПа, оценка НВ по точке перегиба рF-кривой с использованием модели ван-Генухтена (формулы (8)) дала приемлемые результаты ( $0.7\text{--}0.75 W/W_s$ ) только для IV и V групп. В остальных случаях она сильно завышает НВ до значений  $0.6\text{--}0.7 W/W_s$ , не соответствующих реальным данным. Вместе с тем точка перегиба рF-кривых (максимума дифференциальной влагоемкости и распределения пор), дает, по-видимому, максимальное соответствие влажности

**Таблица 2.** Скейлинговые показатели физического качества для основных текстурных классов евразийских почв

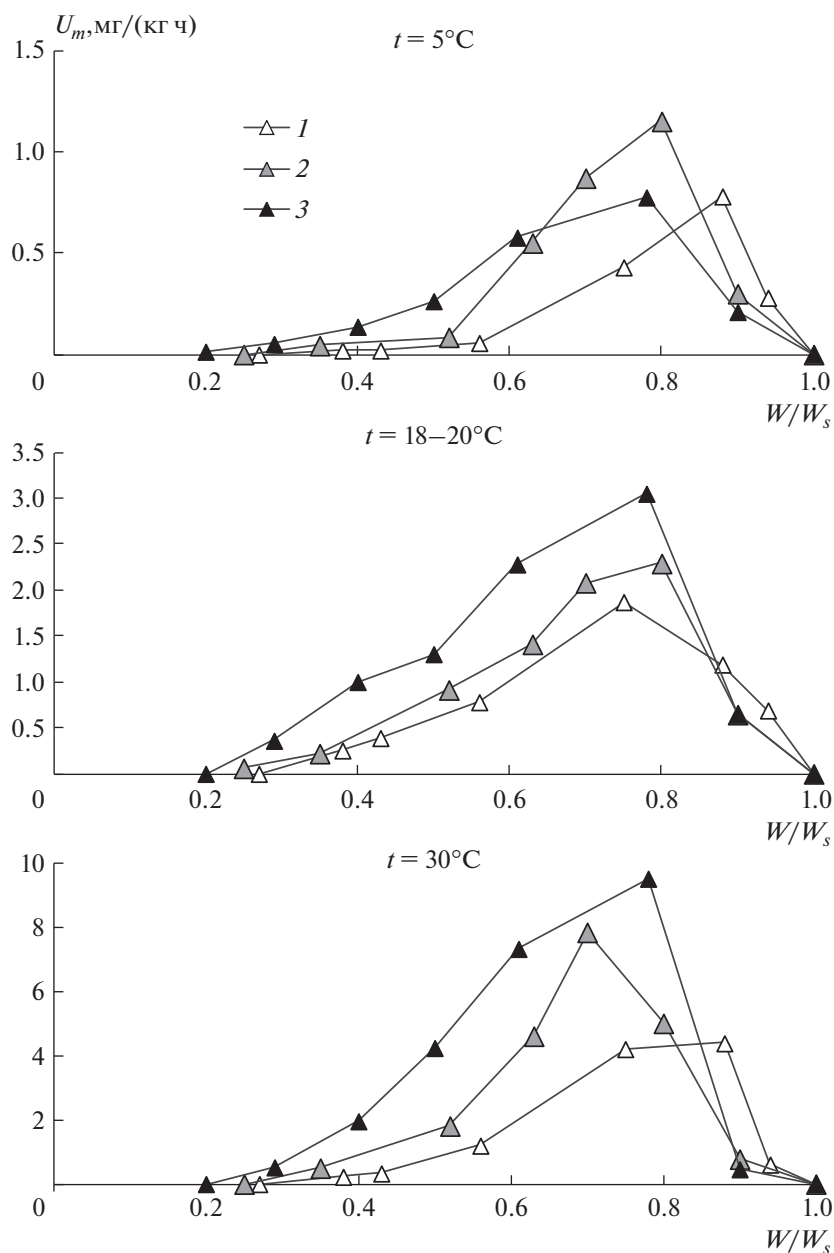
Показатель ФКП	Текстурный класс				
	I	II	III	IV	V
$W_s, \%$	$23.0 \pm 7.6$	$32.1 \pm 3.8$	$44.1 \pm 17.1$	$53.5 \pm 13.8$	$55.1 \pm 15.1$
НВ (в долях $W_s$ )					
НВ/ $W_s$ ( $ P  = 33.3$ кПа)	$0.11 \pm 0.02$	$0.30 \pm 0.04$	$0.46 \pm 0.04$	$0.67 \pm 0.06$	$0.77 \pm 0.06$
НВ/ $W_s$ по Воронину [3]	$0.13 \pm 0.02$	$0.34 \pm 0.04$	$0.47 \pm 0.04$	$0.66 \pm 0.04$	$0.80 \pm 0.06$
НВ/ $W_s$ по (6) ( $ P  = H_c$ )	$0.30 \pm 0.03$	$0.43 \pm 0.03$	$0.52 \pm 0.03$	$0.69 \pm 0.02$	$0.80 \pm 0.02$
НВ/ $W_{s \text{ real}}$	$0.28 \pm 0.09$	$0.45 \pm 0.08$	$0.54 \pm 0.06$	$0.69 \pm 0.05$	$0.81 \pm 0.06$
ММВ или ВРК (в долях $W_s$ )					
ММВ/ $W_s$ по Воронину [3]	$0.13 \pm 0.02$	$0.28 \pm 0.04$	$0.40 \pm 0.06$	$0.53 \pm 0.06$	$0.64 \pm 0.06$
ММВ/ $W_s$ по (9)	$0.10 \pm 0.02$	$0.27 \pm 0.02$	$0.34 \pm 0.05$	$0.52 \pm 0.04$	–
ММВ/ $W_{s \text{ real}}$	$0.12 \pm 0.09$	$0.24 \pm 0.05$	$0.32 \pm 0.03$	$0.47 \pm 0.03$	$0.59 \pm 0.04$
$W_{\text{opt}} / W_{s \text{ real}}$	–	$0.28 \pm 0.02$	$0.37 \pm 0.03$	$0.48 \pm 0.03$	$0.61 \pm 0.02$
ВЗ (в долях $W_s$ )					
ВЗ/ $W_s$ ( $ P  = 1500$ кПа)	$0.06 \pm 0.02$	$0.14 \pm 0.03$	$0.22 \pm 0.03$	$0.32 \pm 0.02$	$0.43 \pm 0.04$
ВЗ/ $W_s$ по [29] ( $VZ = 0.85 + 0.96 VZ_{1500}$ )	$0.09 \pm 0.02$	$0.16 \pm 0.03$	$0.23 \pm 0.03$	$0.32 \pm 0.02$	$0.43 \pm 0.04$
ВЗ/ $W_{s \text{ real}}$	$0.09 \pm 0.04$	$0.18 \pm 0.04$	$0.24 \pm 0.04$	$0.33 \pm 0.04$	$0.49 \pm 0.06$
МАВ или нерастворяющийся объем (в долях $W_s$ )					
МАВ/ $W_s$ по Воронину [3]	$0.04 \pm 0.01$	$0.09 \pm 0.02$	$0.12 \pm 0.02$	$0.18 \pm 0.04$	$0.24 \pm 0.04$
МАВ/ $W_s$ по (9)	$0.02 \pm 0.01$	$0.11 \pm 0.04$	$0.13 \pm 0.04$	$0.21 \pm 0.08$	–
МАВ/ $W_s$ по (10)	$0.03 \pm 0.004$	$0.07 \pm 0.004$	$0.10 \pm 0.01$	$0.15 \pm 0.02$	$0.22 \pm 0.03$

Примечание.  $\pm$  – доверительные интервалы при уровне значимости  $p \leq 0.01$ ;  $\text{real}$  – реальные данные [2, 3, 5, 7, 11–13].

оптимума для базального дыхания и биодеструкторной экологической функции почв на примере зональных почв среднего и тяжелого гранулометрического состава (рис. 4). Из-за отсутствия статистически достоверных аналогичных данных по легким почвам, пока трудно сказать является ли в них состояние НВ ( $0.3\text{--}0.4 W/W_s$ ) или более увлажненное состояние, детектируемое по точке перегиба рF-кривой ( $0.6\text{--}0.7 W/W_s$ ) биологическим оптимумом, но, исходя из стандарта [38], более вероятно второе. Хотя для биологического поглощения монооксида углерода в работе [36] показано, что максимум на кривых зависимости от влажности тесно ( $r = 0.91\text{--}0.95$ ) коррелирует с величиной НВ, оцененной по ОГХ методом Воронина [3, 42], причем в легких почвах он смещается до уровня  $0.25\text{--}0.3 W/W_s$ .

Оценка ММВ (ВРК), как следующей критической точки на ОГХ-диаграммах ФКП, методом Воронина [3, 42] и по максимуму на термодинамических кривых осмотического потенциала в зависимости от влажности с использованием модели (9) в целом дала сопоставимые результаты как друг с другом, так и с реальными данными

(табл. 2). Различия возникали лишь в отдельных случаях (грубодисперсные засоленные почвы, рис. 2, А), что могло быть следствием потери устойчивости пленочной влаги (сжатия ДЭС под воздействием электролитов) или методическим артефактом из-за невысокой точности криоскопического метода для  $P_i$  в песках с низкой влажностью. Сравнение отношений ММВ/НВ для результатов их оценки методом Воронина [3, 42] дало для I и II групп текстурных классов крайне высокие значения  $0.9\text{--}0.95$ , а для остальных –  $0.8$ , что больше принятого в оросительной мелиоративной практике эмпирического предположительного порога ММВ(ВРК) =  $0.7$  НВ [7, 11, 13]. Диагностика критических точек по новой методике стабильно дает отношение ММВ/НВ =  $0.7$  для всех текстурных классов, исключая пески (табл. 2). Гипотеза Воронина [42] о соответствии ММВ и оптимальной для механической обработки влажности ( $W_{\text{opt}}$ ) или так называемой “физической спелости” почвы полностью подтвердилась обобщением и статистическим анализом данных [12] для основных типов евразийских почв разного гранулометрического состава (рис. 5). В целом диапа-

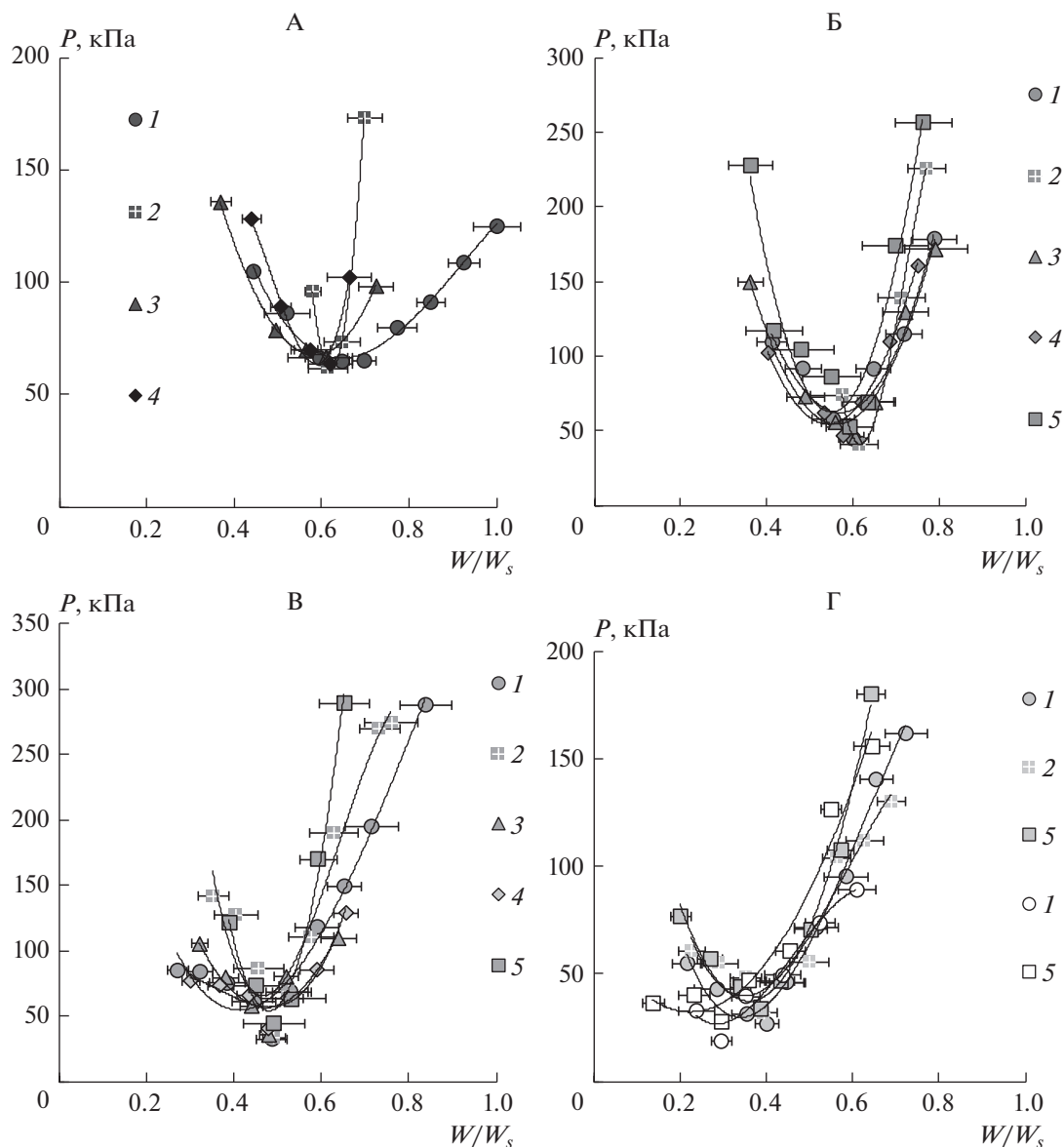


**Рис. 4.** Базальное дыхание зональных почв ( $U_m$ ) по эмиссии  $\text{CO}_2$  в зависимости от влажности и температуры. Почвы: 1 – дерново-подзолистая среднесуглинистая (Московская обл.), 2 – серая лесная среднесуглинистая (Тульская обл.), 3 – чернозем типичный тяжелосуглинистый (Липецкая обл.).

зон НВ-ВРК(ММВ), выделенный косой штриховкой на ОГХ-диаграммах ФКП (рис. 3, Б) определяет оптимальные по влажности условия для механической обработки почвы, а также для экономии водных ресурсов, поскольку вода в таком диапазоне, будучи доступной растениям, характеризуется максимальной концентрацией питательных элементов (максимум  $P_{os}$ , рис. 2) при минимальных непродуктивных потерях на внутрипочвенный сток и испарение. Новый метод диагностики

НВ позволил расширить этот технологически-оптимальный диапазон для груботекстурных классов почв, где исходный метод Воронина [3, 42] давал статистически неразличимые отличия между ММВ и НВ на кривых ОГХ.

Еще одной технологически важной константой является показатель ВЗ – точка устойчивого завядания растений. Ее значения диагностируют состояние засухи, губительное для большинства растений и позволяют рассчитывать диапазон ак-



**Рис. 5.** Сопротивление почвы механической обработке ( $P$ , кПа) в зависимости от относительной влажности ( $W/W_s$ ) для различных текстурных классов евразийских почв (обработка данных [12]). Обозначения: А – глины, Б – тяжелые суглинки, В – средние суглинки, Г – легкие суглинки, супеси. Интенсивность окраски символов постепенно падает от глин до супесей. Типы почв: 1 – дерново-подзолистые, 2 – черноземы, 3 – каштановые, 4 – желтоземы, 5 – серые и бурые лесные.

тивной (доступной) влаги (ДАВ = НВ – ВЗ), обуславливающий урожайность (продуктивность). Получение экспериментальных данных ( $ВЗ_{real}$  в табл. 2) осуществляется достаточно трудоемкими лабораторным методом вегетационных миниатюр [2] или длительными полевыми наблюдениями за ходом роста и развития растений в условиях дефицита влаги [7]. Отсюда актуальность косвенных методов оценки ВЗ по кривым ОГХ при термодинамическом исследовании ФКП. Общепринятый метод Ричардса-Уивера [27] дает адекватную

оценку для тонкодисперсных почв (III–V группы текстурных классов), но в груботекстурных почвах (I–II группы) он систематически занижает значения ВЗ (табл. 2). Этот способ оценки можно улучшить с помощью небольшой коррекции ВЗ по эмпирическому уравнению [29]. В таком случае прогнозные величины совпадают с реальными данными для всех пяти текстурных групп евразийских почв.

Последняя критическая точка на диаграмме ФКП это константа МАВ и близкий к ней показате-

тель нерастворяющегося объема воды в почве. Они имеют важное теоретическое значение как границы прочносвязанной неподвижной воды, не способной диссоциировать соли. Практическая значимость показателя МАВ заключается в применении в моделях транспорта влаги и растворенных веществ, явлений набухания и усадки, прочности и устойчивости агрегатов, в количественной оценке удельной поверхности, ионообменных и сорбционных процессов, а также в ряде педотрансферных функций ОГХ [3, 4, 7, 11, 23]. Данные табл. 2 подтверждают статистически достоверное (в пределах доверительных интервалов) сходство расчетных оценок МАВ по Воронину [42] и экспериментальных оценок по кривым  $P_{os}(W)$  с использованием модели (9) для II, III, и IV групп текстурных классов FAO/USDA почв Евразии. В группе I груботекстурных почв оценка по модели (9) дает двукратное занижение МАВ, что, вероятно, связано с проблемой точности определения  $P_i$  криоскопическим методом в таких объектах. Метод оценки МАВ по фундаментальной формуле (10) также дал близкие к способу Воронина результаты, причем для исходных, не нормированных  $W_s$  величин МАВ выявлена тесная ( $R^2 = 0.989$ ) линейная взаимосвязь сравниваемых показателей с угловым коэффициентом  $1.00 \pm 0.03$  на уровне  $p < 0.0001$ , что свидетельствует о их тождественности и подтверждает гипотезу Воронина [3] об эффективной толщине водной пленки в состоянии МАВ равной трем диаметрам молекул воды.

По аналогии с величиной ММВ (ВРК), показатель МАВ зависит не только от твердофазных характеристик, но и от состава и концентрации жидкой фазы, которые контролируют дебаевскую ширину двойного электрического слоя, устойчивость водных пленок и их расклинивающее давление [15, 34]. Это положение иллюстрирует рис. 2, Д, Е, где показатель МАВ со значениями  $12.2 \pm 0.1\%$  для коллоидно-дисперсного образца торфа с искусственным засолением жидкой фазы 0.5 М раствором NaCl оказался почти вдвое меньше, чем в аналогичном образце, насыщавшемся в дистиллированной воде ( $22.3 \pm 0.6\%$ ).

**Практическое приложение результатов скейлинговой оценки ФКП.** Термодинамические исследования водоудерживающей способности и ФКП, несмотря на очевидную научную и практическую ценность, требуют специального оборудования и навыков, обычно недоступных широкому кругу практиков от агрономов до ландшафтных дизайнеров. Вместе с тем полученные для представительной БД евразийских почв результаты с использованием операции скейлинга позволяют дать простые и удобные для пользователя нормативы ФКП по индексу относительного содержания влаги ( $W/W_s$ ) в связи с основными экологи-

ческими функциями почв в агро- и урбоэкосистемах и технологическими операциям (табл. 3). Индекс  $W/W_s$  легко рассчитывается по данным о влажности и плотности почвы, а современные средства автоматизированного мониторинга содержания влаги в почвах [9, 10] и прогнозные тематические модели [30] позволяют давать оперативную информацию о его динамике и достижении тех или иных критических значений. В частности, по действующей в РФ до 2013 г. инструкции “Критерии опасных гидрометеорологических явлений...” [6] критическая ситуация переувлажнения почвы возникает при сохранении влажности верхнего слоя, соответствующей КВ в течение 20 дней. Индекс  $W/W_s$  дает простую диагностику этого состояния в диапазоне 0.85–0.9 единиц (табл. 3). Выделенный серой заливкой технологически-оптимальный диапазон ФКП минимален в груботекстурных классах I и II (10–15% от полной влагоемкости) и увеличивается до 20% в остальных группах. Это облегчает его оперативную диагностику, своевременное проведение операций обработки почвы с минимальным сопротивлением и крошимостью пласта, организацию поливов с поддержанием оптимальной влажности и экономией водных ресурсов. Однако данные преимущества перед грубодисперсными почвами теряются в условиях естественных осадков (недостатка в аридной и избытка в гумидной зонах) особенно для группы V с самым тяжелым гранулометрическим составом, где более 40% влаги недоступно растениям а более 20% – характеризуются рисками водной эрозии, геокатастроф, повышенных газовых эмиссий, невозможностью прохода колесной техники и механической обработки. В целом каждая группа текстурных классов характеризуется своими критическими значениями индекса  $W/W_s$ , маркирующими смену физических сил и механизмов межфазных взаимодействий, как основного фактора ФКП.

## ВЫВОДЫ

1. Термодинамический подход к оценке физического качества почв объединяет градуалистическое учение о термодинамике почвенной влаги с концепцией почвенно-энергетических констант или критических состояний почвенной физической системы, в которых происходит смена сил и механизмов межфазных взаимодействий, контролирующих водоудерживающую способность и ФКП в целом.

2. На ОГХ-диаграммах выделена новая критическая точка условно-нулевой влажности и стандартного потенциала воды при температуре сушки почвы в  $105^\circ\text{C}$  с абсолютными значениями порядка 1 млн Дж/кг. К этой точке стремятся ОГХ любых почв, что позволяет оценивать их дисперсность и диагностировать состояние МАВ по

**Таблица 3.** Градации индекса  $W/W_0$ , экологические и технологические комментарии по пяти группам основных классов текстуры почвы ФАО/USDA

Нормативы ФКП	Текстурный класс				
	I	II	III	IV	V
Высокие непродуктивные потери (инфильтрация, испарение), угнетение роста из-за отсутствия воздуха в почве (переувлажнение) вплоть до гибели растений при длительном переувлажнении, анаэробнозе и корневой гнили, подавление базального дыхания и быстрой (аэробной) биодegradации органического вещества, выбросы токсичных парниковых газов (метан, оксид азота, сероводород), вязкотекучее состояние с потерей несущей способности и увязанием колесной техники, высокие риски оползней и водной эрозии	>0.90			>0.85	
Оптимальная для высокой продуктивности растений легкодоступная почвенная вода, но высокие непродуктивные потери (инфильтрация, испарение), максимальная биологическая активность и интенсивность органического биоразложения, риск чрезмерного выделения диоксида углерода, высокая гидравлическая проводимость и капиллярный подъем с максимальным риском вторичного засоления орошаемых земель, вязкоупругое состояние с высокой липкостью и сопротивлением механической обработке почвы, сильное сжатие и уплотнение почвы под нагрузками, высокие риски оползней, водной эрозии	0.25–0.90	0.45–0.90	0.55–0.85	0.70–0.85	0.80–0.85
Доступная для растений вода при низких непродуктивных потерях на инфильтрацию и испарение, умеренная биологическая активность (базальное дыхание, интенсивность биодegradации органического вещества, газовыделение), вязкоупругое состояние или упруго-хрупкое состояние вблизи нижней границы диапазона, оптимальное для механической обработки почвы и образования зернистых почвенных агрегатов, максимальная концентрация водорастворимых веществ в почвенном растворе при оптимальном минеральном питании корней, исключая засоленные почвы	0.15–0.25	0.30–0.45	0.35–0.55	0.50–0.70	0.60–0.80
Малодоступная вода для растений, резкое снижение тургора и продуктивности, низкая биологическая активность (интенсивность биодegradации органических веществ, газовыделение), очень низкая гидравлическая проводимость с исчезновением передачи гидростатического давления и транспорта водорастворимых веществ, упруго-хрупкое состояние с высокой плотностью сложения почвы и сопротивлением к механической обработке	0.10–0.15	0.15–0.30	0.20–0.35	0.30–0.50	0.40–0.60

Таблица 3. Окончание

Нормативы ФКП	Текстурный класс				
	I	II	III	IV	V
Недоступная для растений вода в почве, гибель растений во время длительной засухи, почти нулевое базальное дыхание и газовыделение, сохранение микроорганизмов в неактивной форме, высокое сопротивление к механической обработке почвы, хрупкое состояние с интенсивным пылением поверхности почвы, сильная дефляция, высокие риски пыльных и песчаных бурь, частичная или полная гидрофобизация поверхности в период засухи с низким начальным впитыванием осадков	<0.10	<0.15	<0.20	<0.30	<0.40

наклону линейных в полулогарифмических координатах участков ОГХ с использованием модели расклинивающего давления по Дерягину.

3. Сравнительный анализ предложенных в работе физически обоснованных методов выделения критических состояний ММВ (ВРК) и МАВ на ОГХ-диаграммах ФКП с известным эмпирическим методом Воронина показал их хорошее соответствие друг другу и реальным экспериментальным данным для большинства исследованных евразийских почв разного генезиса и дисперсности. Для других состояний возможны сильные расхождения в оценках, в частности – завышения КВ и занижения НВ для груботекстурных классов почв (пески, пылеватые пески, супеси); в этом случае предлагается использовать новые методы оценки: НВ по предельной высоте капиллярного подъема, КВ – по сингулярной точке перегиба ОГХ или давлению входа воздуха с использованием стандартной модели ван-Генухтена.

4. К диапазону КВ–НВ приурочен биологический оптимум базального дыхания и аэробной биодеградации органических веществ в почвах.

5. Для удобства использования результатов термодинамической оценки ФКП предложен простой мониторинговый критерий в форме относительной влажности почвы, нормированной максимальным содержанием влаги в состоянии насыщения (полной влагоемкости). Для основных текстурных классов евразийских почв предложены градации этого показателя в связи с экологическими функциями, сервисами и технологическими операциям в почвах природных и антропогенных ландшафтов.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор благодарит с. н. с. каф. физики и мелиорации почв ф-та почвоведения МГУ, к. б. н. Н.Б. Садовникову и лаборанта кафедры А.С. Башину за предоставление материалов по ОГХ ряда зональных

почв, полученных в рамках задания госбюджетной темы НИР в МГУ: “Физические основы экологических функций почв: технологии мониторинга, прогноза и управления”.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 19-29-05006\19).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов А.В. Физико-механические свойства почв и энергетическое состояние почвенной влаги. Автореф. дис. ... канд. биол. н. М., 2003. 24 с.
2. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв и грунтов. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
3. Воронин А.Д. Структурно-функциональная гидрофизика почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. 204 с.
4. Грунтоведение. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 1024 с.
5. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. М.: Наука, 1985. 398 с.
6. Критерии опасных гидрометеорологических явлений и порядок подачи штормового сообщения. Инструкция. РД 52.04.563-2002. <https://docs.cntd.ru/document/1200034751>. Дата обращения 19.04.2021.
7. Роде А.А. Избр. тр. Т. 3. Основы учения о почвенной влаге. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 664 с.
8. Смагин А.В. Почвенно-гидрологические константы: физический смысл и количественная оценка на базе равновесного центрифугирования // Доклады по экологическому почвоведению. 2006. Т. 1. № 1. С. 31–56.
9. Смагин А.В. Теория и практика конструирования почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2012. 544 с.
10. Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Глаголев М.В., Курченко А.В. Новые инструментальные методы и



- портативные электронные средства контроля экологического состояния почв и сопредельных сред // Экол. Вестн. Сев. Кавказа. 2006. Т. 2. № 1. С. 5–17.
11. Теории и методы физики почв. Тула: Гриф и К, 2007. 616 с.
  12. Физико-механические свойства растений, почв и удобрений. М.: Колос, 1970. 424 с.
  13. Харченко С.И. Управление водным режимом на мелиорируемых землях в нечерноземной зоне. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 238 с.
  14. Campbell G.S. Soil Physics with BASIC. N.Y.: Elsevier Sci., 1985.
  15. Churaev N.V. Derjagin disjoining pressure in the colloid science and surface phenomena // Advances in Colloid and Interface Science. 2003. V. 104(1–3). P. 15–20. [https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(03\)00032-0](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(03)00032-0)
  16. Dexter A.R. Soil physical quality: part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth // Geoderma. 2004. V. 120. P. 201214.
  17. Dexter A.R. Soil physical quality: part II. Friability, tillage, tilling and hard-setting // Geoderma. 2004. V. 120. P. 215225.
  18. Dexter A.R. Soil physical quality: part III. Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory // Geoderma. 2004. V. 120. P. 227239.
  19. Doran J.W., Jones A.J. (eds.) Methods for assessing soil quality // Soil Sci. Soc. Am. J. 1996. № 49.
  20. Karlen D.L., Andrews S.S., Wienhold B.J., Zobeck T.M. Soil Quality Assessment: Past, Present and Future // Elect. J. Integr. Biosciences. 2008. V. 6. P. 314.
  21. Keen B.A. The physical properties of the soil. London, N.Y., Toronto: Longmans, Green and Co, 1931.
  22. Lal R. Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality and sustainability // Soil Till. Res. 1993. V. 27. P. 17.
  23. 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>
  24. 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>
  25. Resurreccion A.C., Moldrup P., Tuller M., Ferre T.P.A., Kawamoto K., Komatsu T., de Jonge W.L. Relationship between specific surface area and the dry end of the water retention curve for soils with varying clay and organic carbon contents // Water Resour. Res. 2011. V. 47. P. W06522.
  26. Reynolds W.D., Bowman B.T., Drury C.F., Tan C.S., Lu X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters // Geoderma. 2002. V. 110. P. 31146.
  27. Richards L.A., Weaver L.R. Fifteen-atmosphere-percentage as related to the permanent wilting percentage // Soil Sci. 1943. V. 56. P. 331339.
  28. Richards L.A., Weaver L.R. Moisture retention by some irrigated soils as related to soil-moisture retention // J. Agr. Researh. 1944. V. 69. P. 215235.
  29. Shaw B.T. (ed.) Soil physical conditions and plant growth. N.Y.: Am. Soc. of Agr. Academic Press, 1952.
  30. 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. 2006. Technical Manual, Version 1.0. PC Progress, Prague, Czech Republic.
  31. 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>
  32. Smagin A.V. Ionic-electrostatic model of the wedge pressure and specific surface area of colloidal systems // J. Engineer. Phys. Thermophysics. 2019. V. 92. P. 744755. <https://doi.org/10.1007/s10891-019-01986-8>
  33. Smagin A.V. Physically Based Mathematical Models of the Water Vapor Sorption by Soils // Eur. Soil Sci. 2011. V. 44. P. 659669. <https://doi.org/10.1134/S1064229318070098>
  34. Smagin A.V. Theory and methods of evaluating the physical status of soils // Eur. Soil Sci. 2003. V. 36. P. 301312.
  35. Smagin A.V. Thermogravimetric Determination of Specific Surface Area for Soil Colloids. // Colloid J. 2016. V. 78. P. 391396. <https://doi.org/10.1134/S1061933X16030170>
  36. Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Mazanova V.S., Dolzhich A.R. Adsorption of Carbon Monoxide by Samples of Soils and Peat–Sand Mixtures // Eur. Soil Sci. 2009. V. 42. № 11. P. 1234–1240. <https://doi.org/10.1134/S1064229309110052>
  37. Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Kirichenko A.V., Egorov Yu.V., Vityazev V.G., Bashina A.S. Dependence of the Osmotic Pressure and Electrical Conductivity of Soil Solutions on the Soil Water Content // Eur. Soil Sci. 2018. V. 51. P. 14401451. <https://doi.org/10.1134/S1064229318120128>
  38. Soil quality laboratory methods for determination of microbial soil respiration. International Organization for Standardization. ISO 16072. 2002. Geneva, Switzerland.
  39. Sudnitsyn I.I., Smagin A.V., Shvarov A.P. The theory of Maxwell-Boltzmann-Helmholtz-Gouy about the double electric layer in disperse systems and its application to soil science (on the 100th anniversary of the paper published by Gouy) // Eur. Soil Sci. 2012. V. 45. P. 452457. <https://doi.org/10.1134/S106422931204014X>
  40. Tuller M., Or D. Water films and scaling of soil characteristic curves at low water contents // Water Resour. Res. 2005. V. 41. P. W09403.
  41. 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.
  42. Voronin A.D. Energy Concept of the Physical State of Soils // Eur. Soil Sci. 1990. V. 23. P. 7–19.

## Thermodynamic Concept of the Physical Quality of Soils

A. V. Smagin<sup>1, 2, 3, \*</sup>

<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

<sup>2</sup>*Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences, Uspenskoe, Moscow oblast, 143030 Russia*

<sup>3</sup>*Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, 117198 Russia*

*\*e-mail: smagin@list.ru*

The physical quality of the soil is determined by interactions among soil phases at variable moisture content. This phenomenon allows us to consider the water retention curves as functions of water content and its thermodynamic potentials as indicators of the soil physical quality and its dynamics. Diagrams of the physical quality of soils represented by water retention curves with areas of dominance of certain physical mechanisms and forces responsible for the interaction of physical phases were obtained for Eurasian soils database (more than 400 samples) grouped by five FAO/USDA textural classes. Original instrumental methods using centrifugal, gravitational, and temperature physical fields for water removal made it possible for the first time to obtain the thermodynamic characteristics of water retention in the entire range of soil water potential from 0 to 1 million J/kg. The main fundamental result is a physically based methodology for diagnosing the limiting (critical) values of the soil water content and its thermodynamic potentials, which divide the areas of dominance of various forms of soil moisture, physical forces and mechanisms of interphase interactions on the diagrams of the physical quality of soils. The significance of non-capillary, surface forces and mechanisms controlling water retention and physical quality of soils is shown. The results of determining the optimal ranges of water content for Eurasian soils of different texture and genesis in connection with their soil-ecological and technological functions and services are the main practical significance of the study.

*Keywords:* soil water, thermodynamic potential, capillarity, disjoining pressure, specific surface area, stability of water films, critical parameters of water retention, optimal water content