

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СУШИ С АТМОСФЕРОЙ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

УДК 551.524.4

ПРИМЕНИМОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ ПЕДОСТРАНСФЕРНЫХ ФУНКЦИЙ К ОПИСАНИЮ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЧВ (ГРУНТОВ)¹

© 2023 г. А. А. Рязанова^{a, b, *}, В. Ю. Богомолов^{a, b, c, d, e}, А. И. Медведев^{e, f}

^aИнститут мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
Томск, 634055 Россия

^bИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН,
Москва, 119017 Россия

^cНаучно-исследовательский Томский государственный университет,
Томск, 634050 Россия

^dНаучно-исследовательский вычислительный центр,
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия

^eИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

^fГидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации,
Москва, 123376 Россия

*e-mail: r.ann.1194@gmail.com

Поступила в редакцию 01.02.2023 г.

После доработки 05.04.2023 г.

Принята к публикации 05.04.2023 г.

Проведен сравнительный анализ гидрофизических характеристик, полученных с помощью педострансферных функций, и гидрофизических характеристик из глобального почвенного набора.

Ключевые слова: моделирование, гидравлическая проводимость, потенциал влаги.

DOI: 10.31857/S0321059623600114, **EDN:** LHPGZL

ВВЕДЕНИЕ

Почва играет важную роль в энергетическом и водном обмене между земной поверхностью и атмосферой, поэтому блоки деятельного слоя суши входят в состав всех систем прогноза погоды и моделей Земной системы, независимо от пространственных и временных масштабов воспроизводимых процессов. Они, в частности, описывают водный и энергетический балансы, включающие осадки, испарение, поверхностный сток, инфильтрацию, питание подземных вод и фазовые переходы. Для адекватного воспроизведения влажности и температуры почвы в моделях деятельного слоя суши требуется набор параметров, представляющих гидравлические, термические и

радиационные свойства почвы. При математическом описании тепловлагоденоса в почве все физические процессы, как правило, предполагаются одномерными по вертикали, поскольку вертикальная компонента градиентов температуры и влаги в различных ее состояниях обычно значительно превосходит горизонтальные компоненты.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Уравнения тепловлагоденоса в почве с учетом корневой системы растительности для модели деятельного слоя суши ИВМ РАН–МГУ записываются в виде [2–5]:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \lambda_T \frac{\partial T}{\partial z} + L_i F_i - L_v F_v, \quad (1)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \lambda_w \frac{\partial W}{\partial z} + \frac{\partial \gamma}{\partial z} - F_i - F_v - R_f - R_r, \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \lambda_v \frac{\partial V}{\partial z} + F_v, \quad (3)$$

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 21-17-00254, эксперименты с моделью деятельного слоя суши; РФФИ (проект 22-47-04408, анализ применимости различных ПТФ для описания болотных грунтов); в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН (121031300158-9, разработка программного модуля для расчета ПТФ), в рамках государственного задания ИВП РАН (FMWZ-2022-0001, анализ ГПН).

$$\frac{\partial I}{\partial t} = F_f, \quad (4)$$

начальные условия для T , W :

$$T(z, t_0) = T_0(z), \quad W(z, t_0) = W_0(z), \quad (5)$$

граничные условия для T , W (на нижней границе ставится условие непроницаемости):

$$T(0, t) = T_s(t), \quad \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=H} = 0, \quad (6)$$

$$\lambda_w \left. \frac{\partial W}{\partial z} \right|_{z=0} = B_w, \quad \lambda_w \left. \frac{\partial W}{\partial z} \right|_{z=H} = 0, \quad (7)$$

t — время, с; z — направленная вверх вертикальная координата, см; T — температура, °C; W — количество жидкой влаги в долях веса сухой почвы, г/г; λ_T — коэффициент теплопроводности, кал/(г К); λ_w — коэффициент диффузии жидкой воды, см²/с; C — теплоемкость почвы, кал/(гК); γ — гидравлическая проводимость, или скорость инфильтрации воды под действием силы тяжести, см/с; F_i — скорость изменения количества жидкой влаги и льда за счет процессов замерзания/таяния, с⁻¹; F_v — скорость изменения содержания водяного пара и воды за счет процессов испарения/конденсации, с⁻¹; R_f — изменение влагосодержания за счет горизонтального стока воды, с⁻¹; R_r — скорость всасывания воды корневой системой растительности, с⁻¹; t_0 , T_0 , W_0 — начальные время, температура и количество жидкой влаги; H — глубина нижнего уровня, см; T_s — температура поверхности, °C. Коэффициент диффузии влаги и гидравлическая проводимость связаны через капиллярно-сорбционный потенциал (основная гидрофизическая характеристика) Ψ : $\lambda_w = \gamma \partial \Psi / \partial W$.

Коэффициент теплопроводности в модели задается по формулам Пильке, Йохансена или Коте—Конрада [15]. Для задания гидрофизических характеристик λ_w и γ в модели реализованы параметризации Брукса—Кори (Клаппа—Хорнбергера) [10, 12] и Муалема—ван Генухтена [18, 29]. В данной работе будем рассматривать только параметризацию Клаппа—Хорнбергера как часто используемую в моделях деятельного слоя суши:

$$\Psi = \Psi_{\max} \left(\frac{W_{\max}}{W} \right)^b, \quad \lambda_w = \lambda_{\max} \left(\frac{W}{W_{\max}} \right)^{b+2}, \quad (8)$$

$$\gamma = \gamma_{\max} \left(\frac{W}{W_{\max}} \right)^{2b+3},$$

$$\lambda_{\max} = \frac{b \gamma_{\max} (-\Psi_{\max})}{W_{\max}}, \quad (9)$$

где $\Psi_{\max}$ — потенциал влаги при достижении влажностью максимальной влагоемкости почвы (состояние насыщения), см; $\gamma_{\max}$ — гидравлическая проводимость в состоянии насыщения, см/с; $\lambda_{\max}$ —

значение коэффициента диффузии влаги в состоянии насыщения, см²/с; $W_{\max} = \Pi/\rho$ — максимальная влагоемкость почвы, Π — пористость, ρ — плотность почвы, г/см³; b — безразмерный параметр.

Таким образом, при моделировании профиля температуры и влаги возникает вопрос, как задавать гидрофизические параметры $\Psi_{\max}$, $\lambda_{\max}$, $\gamma_{\max}$, b , $W_{\max}$. Изначально в модели реализован подход, при котором по заданному гранулометрическому составу и пористости определяется тип почвы по классификации почв USDA [26], а затем для выбранного типа почвы из имеющейся таблицы [1] выбираются средние значения гидрофизических параметров. Такой подход не всегда дает надежные результаты: например, при попадании параметров гранулометрического состава в границы типов почвы по какой-либо классификации гидрофизические параметры могут сильно отличаться от средних значений для типов почвы в силу того, что непрерывные педотрансферные функции при данном подходе заменяются кусочно-постоянными зависимостями. На значимость подобных эффектов указывает большая разность средних по типам почвы значений гидрофизических параметров, хорошо заметная на примере основной гидрофизической характеристики (ОГХ) (рис. 1). Также в описанном выше подходе не учитывается влияние органического вещества почв на гидрофизические параметры.

Для устранения недостатков используемого в модели подхода существует несколько вариантов.

Первый вариант — это проведение прямых *in situ* измерений требуемых гидрофизических характеристик при наличии почвенных образцов, что трудоемко, сопряжено с ошибками измерений и не обеспечивает регулярного по горизонтали покрытия в региональном и глобальном масштабе. Такой вариант применим в случае запусков модели для одиночной ячейки или локального почвенного профиля.

Второй вариант предполагает использование педотрансферных функций (ПТФ) [8]. По Е.В. Шенину [6], ПТФ — это эмпирические зависимости, позволяющие восстанавливать основные гидрофизические функции почв, в том числе ОГХ, по известным из материалов Почвенных служб и массово определяемым базовым свойствам почв, таким как гранулометрический состав, пористость, плотность и содержание органического вещества. Использование ПТФ позволяет получить гидрофизические параметры с тем же пространственным охватом и разрешением, что и базовые свойства.

Существует множество ПТФ, они условно делятся на три большие группы: классовые, непрерывные и полученные на основе нейронных сетей. В классовых ПТФ гидрофизические пара-

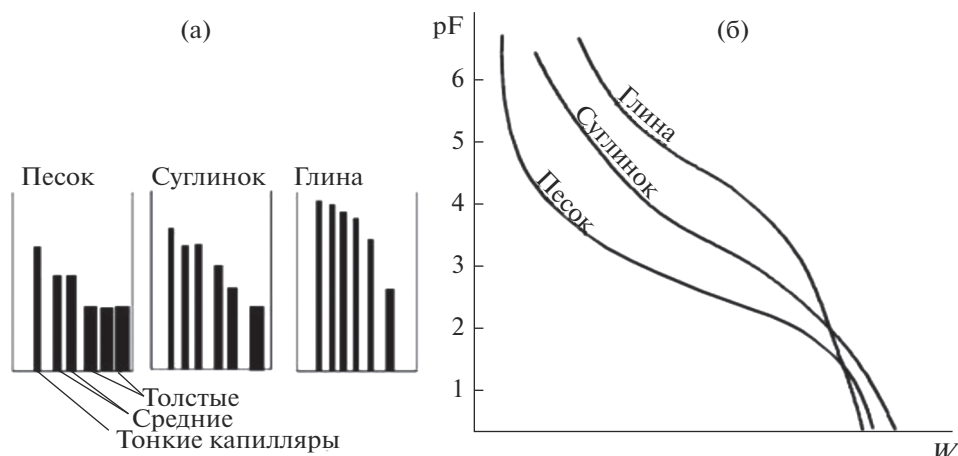


Рис. 1. Изменение ОГХ для почв разного гранулометрического состава [6].

метры определяются только текстурным классом почвы (к текстурным классам относятся, например, песок, глина, супесь и др.) в предположении, что почвы близких классов имеют схожие гидравлические свойства. Непрерывные ПТФ в качестве аргументов принимают объемное содержание глины V_{clay} , ила V_{silt} , песка V_{sand} , т. е. компоненты гранулометрического состава, и в некоторых случаях органического вещества V_{SOM} , а также пористости θ_s , что дает значения для гидрофизических характеристик для всего множества типов почв. В качестве примера непрерывной ПТФ приведем ПТФ Косби [13]:

$$\psi_{\max} = 10^{(1.54 - 0.0095V_{\text{sand}} + 0.0063V_{\text{silt}})}, \quad (10)$$

$$b = 3.10 + 0.157V_{\text{clay}} - 0.003V_{\text{sand}}, \quad (11)$$

$$\gamma_{\max} = 10^{(-0.6 + 0.0126V_{\text{sand}} - 0.0064V_{\text{clay}})}, \quad (12)$$

где V_{clay} , V_{silt} , V_{sand} — объемное содержание фракций частиц (песка, ила, глины) гранулометрического состава, т. е. $V_{\text{clay}} + V_{\text{silt}} + V_{\text{sand}} = 100\%$.

Третий вариант подхода — использование глобальных наборов данных почвенного состава и гидрофизических характеристик. Пример такого набора — глобальный почвенный набор (ГПН) почвенных гидравлических и термических харак-

теристик для моделирования деятельного слоя суши [14]. Почвенные характеристики этого набора данных приведены в табл. 1. Все характеристики представлены глобальными полями с пространственным разрешением 30", имеют четыре варианта распределения по горизонтальным слоям (максимум 8 слоев до глубины 3.8 м) и доступны для свободной загрузки.

Таким образом, вопрос исследования можно переформулировать следующим образом: будет ли обеспечена приемлемая точность моделирования при использовании внутри модели деятельного слоя суши какой-то одной, в некотором смысле оптимальной, ПТФ для расчета гидрофизических характеристик по внешним данным о составе почвы, либо необходимо использовать глобальные наборы информации и по гранулометрическому составу, и по гидрофизическим характеристикам? Для ответа на этот вопрос в настоящей работе проведен анализ наиболее часто используемых в научной литературе и исследованиях ПТФ, на основе которого можно выбрать оптимальную (одну) ПТФ для включения ее в модель деятельного слоя.

Для расчета потенциала влаги насыщенной почвы и безразмерного показателя Клаппа—

Таблица 1. Основные свойства почвы

V_{gravel} , V_{SOM} , V_{sand} , V_{silt} , V_{clay} , θ_s	Объемные фракции гравия, органического вещества почв, песка, ила и глины, а также содержание насыщенной воды, эквивалентное пористости ($V_{\text{gravel}} + V_{\text{SOM}} + V_{\text{sand}} + V_{\text{silt}} + V_{\text{clay}} + \theta_s = 100\%$)
Гидрофизические характеристики для параметризации Клаппа—Хорнбергера	
$\psi_{\max}$	Потенциал влаги при максимальном насыщении, см
b	Безразмерный параметр
$\gamma_{\max}$	Гидравлическая проводимость при максимальном насыщении, см/д

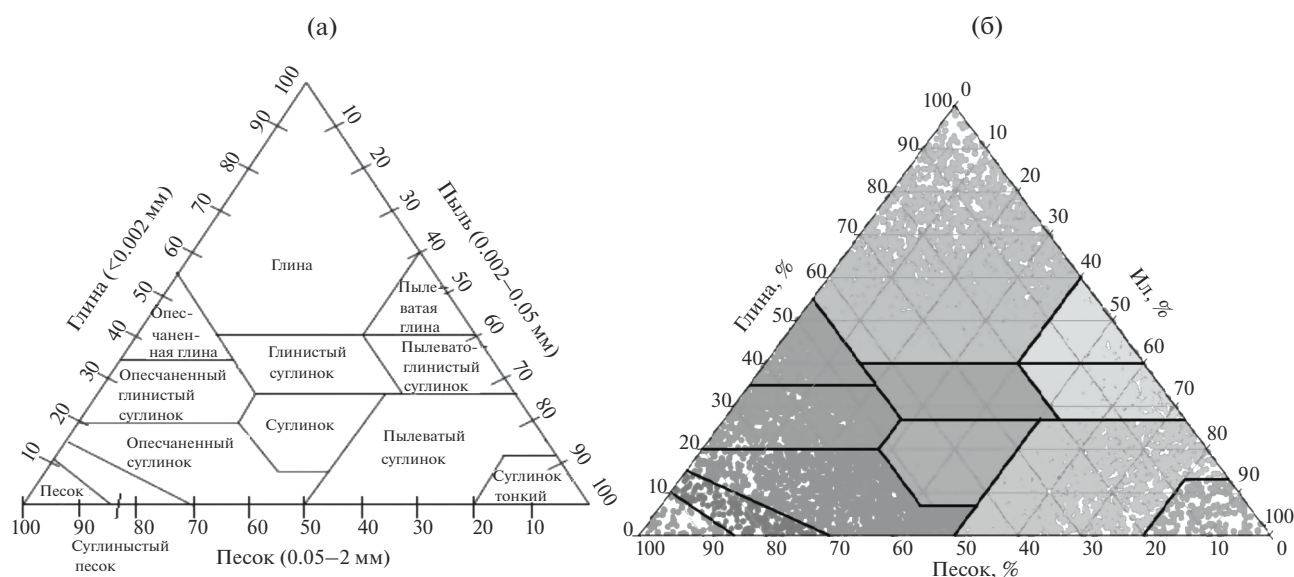


Рис. 2. Треугольник Ферре для классификации типов почвы по USDA [27] (а) и распределение статистической выборки значений почвенных фракций (гранулометрического состава; белый цвет на треугольнике означает отсутствующие комбинации почвенных фракций, если увеличивать размер выборки, то площадь белого цвета будет сокращаться) (б).

Хорнбергера часто используются следующие ПТФ: Сакстона [24], Кэмпбелла [11], Ролза [9], Остервельда [21], Уильямса [30], Майра [19], Сакстона и Ролза [23], Косби [13]. Для расчета гидравлической проводимости часто используют ПТФ: Сакстона [24], Ролза [9], Косби [13], Востена [31, 32], Джабро [18], Оттони [22], Швета–Прасана [25], Немеса [20], Томасселы [28]. Формулы для этих ПТФ представлены в табл. 2.

На базе языка программирования Python был создан программный модуль, реализующий набор функций, требуемых для расчета выбранных ПТФ, а также предоставляющий возможность получения результатов в графическом виде для их анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе работы для расчета гидрофизических характеристик с применением ПТФ использовались смоделированные показатели состава почвы. Для моделирования содержания песка, глины и ила авторы данной работы придерживаются классификации почв USDA (США, “Department of agriculture”), разработанной Министерством сельского хозяйства США и Национальным объединением исследователей почв [26]. Данная классификация наглядно демонстрируется с помощью треугольника Ферре [27] (рис. 2). Случайным образом на основе равномерного распределения было сгенерировано множество значений объемного содержания песка, ила и глины с учетом того, что всегда выполняется следующее

выражение: $V_{\text{clay}} + V_{\text{silt}} + V_{\text{sand}} = 100\%$. В качестве значений θ_s и V_{SOM} на основе данных из ГПН рассчитаны средние значения этих характеристик для каждого типа почвы, который определялся согласно методике [7] по треугольнику Ферре.

Для начала был проведен тестовый расчет ПТФ из программного модуля на Python. Результаты расчета сравнивались с результатами расчета PTF Calculator для MS Excel, разработанный в 2010 г. А. Губером и Я. Пачепски [16]. Тест был пройден успешно, результаты тестового расчета совпали с результатами PTF Calculator.

После этого был проведен основной расчет гидрофизических характеристик с помощью выбранных ПТФ с использованием ранее сгенерированного множества значений объемного содержания песка, ила и глины (рис. 3, 4).

Некоторые ПТФ дают сильно завышенные значения относительно других, что объясняется тем, что эти ПТФ могут давать ошибочные граничные гидрофизические характеристики, в некоторых оригинальных публикациях даются границы применимости ПТФ (например ПТФ Ролза применима только тогда, когда $5\% < V_{\text{clay}} < 60\%$ и $5\% < V_{\text{sand}} < 70\%$), что сразу же накладывает ограничения на их использование. Также на графиках гидрофизических характеристик, при расчете которых использовались ПТФ, зависящие не только от гранулометрического состава, но и от пористости/содержания органического вещества почв, наблюдаются линии разрыва. Возможно, это объясняется тем, что для сгенерированной выборки

Таблица 2. Непрерывные ПТФ

ПТФ	Формула
Сакстон [24]	$A = 100 \exp \left[a + bV_{\text{clay}} + cV_{\text{sand}}^2 + dV_{\text{sand}}^2 V_{\text{clay}} \right]$ $B = e + fV_{\text{clay}}^2 + gV_{\text{sand}}^2 V_{\text{clay}}$ $\Psi_{\text{max}} = A\theta_s^B$ $b = B$ $\gamma_{\text{max}} = \exp \left(p + qV_{\text{sand}} + \frac{r + tV_{\text{sand}} + uV_{\text{clay}} + vV_{\text{clay}}^2}{\theta_s} \right)$ $a, b, c, d, e, f, g, r, t, u, v$ – заданные константы
Кэмпбелл [11]	$f_{\text{clay}} = V_{\text{clay}}/100; \quad f_{\text{sand}} = V_{\text{sand}}/100$ $d_g = \exp[-0.80 - 3.17f_{\text{sand}} - 7.61f_{\text{clay}}]$ $\sigma_g = \exp[13.32f_{\text{sand}} + 47.7f_{\text{clay}} - \ln^2 d_g]^{0.5}$ $\Psi_{\text{es}} = -0.05d_g^{-1/2}$ $b = -20\Psi_{\text{es}} + 0.2\sigma_g$ $\Psi_{\text{max}} = 100.0(\rho_b/1.3)^{0.67b}, \quad \rho_b \text{ – плотность почвы, г/м}^3$
Ролз [9]	$\Psi_{\text{max}} = \exp(5.3396738 + 0.1845038V_{\text{clay}} - 2.48394546$ $\overline{\theta_s} = 0.00213853V_{\text{clay}}^2 - 0.04356349V_{\text{sand}}\theta_s - 0.61745089V_{\text{clay}}\theta_s +$ $+ 0.00143598V_{\text{sand}}^2\theta_s^2 - 0.00855375V_{\text{clay}}^2\theta_s^2 - 0.00001282V_{\text{sand}}^2V_{\text{clay}} + 0.00895359V_{\text{clay}}^2\theta_s -$ $- 0.00072472V_{\text{sand}}^2\theta_s + 0.0000054V_{\text{clay}}^2V_{\text{sand}} + 0.50028060\theta_s^2V_{\text{clay}})$ $b = 1/(\exp(-0.7842831 + 0.0177544V_{\text{sand}} - 1.062498\theta_s - 0.00005304V_{\text{sand}}^2 -$ $- 0.00273493V_{\text{clay}}^2 + 1.11134946\theta_s^2 - 0.03088295V_{\text{sand}}\theta_s + 0.00026587V_{\text{sand}}^2\theta_s^2 -$ $- 0.00610522V_{\text{clay}}^2\theta_s^2 - 0.00000235V_{\text{sand}}^2V_{\text{clay}} + 0.00798746V_{\text{clay}}^2\theta_s - 0.00674491\theta_s^2V_{\text{clay}})$ $\gamma_{\text{max}} = \exp(19.52348\theta_s - 8.96847 - 0.028212V_{\text{clay}} + 0.00018107V_{\text{sand}}^2 - 0.0094125V_{\text{clay}}^2 -$ $- 8.395215\theta_s^2 + 0.077718V_{\text{sand}}\theta_s - 0.00298V_{\text{sand}}^2\theta_s^2 - 0.019492V_{\text{clay}}^2\theta_s^2 + 0.0000173V_{\text{sand}}^2V_{\text{clay}} +$ $+ 0.02733V_{\text{clay}}^2\theta_s + 0.001434V_{\text{sand}}^2\theta_s - 0.0000035V_{\text{clay}}^2V_{\text{sand}})$
Остервельд [21]	$A = \frac{\rho_b}{100}(35.36 + 0.644V_{\text{clay}} - 0.251V_{\text{sand}} + 0.675)$ $b = \frac{1}{0.19}$ $\Psi_{\text{max}} = 10(A/\theta_s)^b$
Уильямс 1 [30]	$A = 1.839 + 0.257 \ln(V_{\text{clay}}) + 0.7624 - 0.0001V_{\text{sand}}^2$ $B = -0.303 + 0.093 \ln(\rho_b) + 0.0565 \ln(V_{\text{clay}}) - 0.00003V_{\text{sand}}^2$ $b = -1/B$ $\Psi_{\text{max}} = 1000 \exp \left(\frac{\ln(1000\theta_s) - A}{B} \right)$

Таблица 2. Продолжение

ПТФ	Формула
Уильямс 2 [30]	$A = 2.57 + 0.238 \ln(V_{\text{clay}}) - 0.000192V_{\text{sand}}^2 - 0.0926 \ln(V_{\text{SOM}}) + 0.0412V_{\text{SOM}}$ $B = -0.403 + 0.0871 \ln(V_{\text{clay}}) - 0.00077V_{\text{sand}}$ $b = -1/B$ $\Psi_{\max} = 1000 \exp\left(\frac{\ln(100\theta_s) - A}{B}\right)$
Майр [19]	$\Psi_{\max} = \exp(-4.9840297533 + 0.0509226283V_{\text{sand}} + 0.1575152771V_{\text{silt}} +$ $+ 0.1240901644\rho_b - 0.1640033143V_{\text{OC}} - 0.0021767278V_{\text{silt}}^2 +$ $+ 0.0000143822V_{\text{silt}}^3 + 0.0008040715V_{\text{clay}}^2 + 0.0044067117V_{\text{OC}}^2)$ $b = 1.0/\exp(-0.8466880654 - 0.0046806123V_{\text{sand}} + 0.0092463819V_{\text{silt}} - 0.4542769707\rho_b -$ $- 0.0497915563V_{\text{OC}} + 0.0003294687V_{\text{sand}}^2 -$ $- 0.000001689056V_{\text{sand}}^3 + 0.0011225373V_{\text{OC}}^2)$ где $V_{\text{OC}} = V_{\text{SOM}}/1.724$
Сакстон и Ролз [23]	$x = (-0.00251V_{\text{sand}} + 0.00195V_{\text{clay}} + 0.011V_{\text{SOM}} + 0.00006V_{\text{sand}}V_{\text{SOM}} - 0.00027V_{\text{clay}}V_{\text{SOM}} +$ $+ 0.0000452V_{\text{sand}}V_{\text{clay}} + 0.299)$ $y = x + (1.283x^2 - 0.374x - 0.015)$ $z = -0.02 + 1.14(-0.00024V_{\text{sand}} + 0.00487V_{\text{clay}} + 0.006V_{\text{SOM}} + 0.00005V_{\text{sand}}V_{\text{SOM}} -$ $- 0.00013V_{\text{clay}}V_{\text{SOM}} + 0.0000068V_{\text{sand}}V_{\text{clay}} + 0.031)$ $\bar{\theta}_s = y - 0.064 - 0.00097V_{\text{sand}} + 1.636(0.00278V_{\text{sand}} + 0.00034V_{\text{clay}} + 0.022V_{\text{SOM}} -$ $- 0.00018V_{\text{sand}}V_{\text{SOM}} - 0.00027V_{\text{clay}}V_{\text{SOM}} - 0.0000584V_{\text{sand}}V_{\text{clay}} + 0.078)$ $b = \frac{\ln 1500 - \ln 33}{\ln y - \ln z}$ $\Psi_{\max} = 10\bar{\theta}_s^{-b} \exp(\ln 33 + b \ln y)$
Косби 1 [13]	$\Psi_{\max} = 10^{(1.54 - 0.0095V_{\text{sand}} + 0.0063V_{\text{silt}})}$ $b = 3.10 + 0.157V_{\text{clay}} - 0.003V_{\text{sand}}$ $\gamma_{\max} = 2.54 \times 10^{(-0.6 + 0.0126V_{\text{sand}} - 0.0064V_{\text{clay}})}$
Косби 2 [13]	$\Psi_{\max} = 10^{(1.88 - 0.0131V_{\text{sand}})}$ $b = 2.91 + 0.159V_{\text{clay}}$
Востен 1 [31]	topsoil = 1 $\gamma_{\max} = 0.04167 \exp(7.755 + 0.0352V_{\text{silt}} + 0.93\text{topsoil} - 0.967\rho_b^2 - 0.000484V_{\text{clay}}^2 -$ $- 0.000322V_{\text{silt}}^2 + 0.001/V_{\text{silt}} - 0.0748/V_{\text{SOM}} - 0.643 \ln V_{\text{silt}} - 0.01398\rho_bV_{\text{clay}} -$ $- 0.1673\rho_bV_{\text{SOM}} + 0.02986\text{topsoil}V_{\text{clay}} - 0.03305\text{topsoil}V_{\text{silt}})$

Таблица 2. Продолжение

ПТФ	Формула
Востен 2 [32]	$\gamma_{\max} = 0.04167 \exp(-42.6 + 8.71V_{\text{SOM}} + 61.9\rho_b - 20.79\rho_b^2 - 0.2107V_{\text{SOM}}^2 - 0.0162V_{\text{clay}}V_{\text{SOM}} - 5.382\rho_bV_{\text{SOM}})$
Джабро [18]	$\gamma_{\max} = 10^{(9.56 - 0.81\ln 10(V_{\text{silt}}) - 1.09\ln 10(V_{\text{clay}}) - 4.64\rho_b)}$
Оттони 1 [22]	$\gamma_{\max} = 10^{(2.039 - 0.00874V_{\text{silt}} - 0.00723V_{\text{clay}})/24}$
Оттони 2 [22]	$\gamma_{\max} = 10^{(3.998 - 0.0101V_{\text{silt}} - 0.0152V_{\text{clay}} - 1.163\rho_b)/24}$
Швета– Прасана 1 [25]	$\gamma_{\max} = -1.272 - 0.0433V_{\text{silt}} + 0.693V_{\text{SOM}} + 13.04\theta_s + 0.0009V_{\text{silt}}^2 - 0.0074V_{\text{silt}}V_{\text{SOM}} - 0.091V_{\text{silt}}\theta_s - 0.0036V_{\text{SOM}}^2 - 1.128V_{\text{SOM}}\theta_s - 3.204\theta_s^2$
Швета– Прасана 2 [25]	$\gamma_{\max} = 80.16 + 0.81V_{\text{sand}} - 143.57\rho_b + 21.99V_{\text{SOM}} + 0.002V_{\text{sand}}^2 - 0.687V_{\text{sand}}\rho_b - 0.0022V_{\text{sand}}V_{\text{SOM}} + 63.33\rho_b^2 - 13.63\rho_bV_{\text{SOM}} - 0.219V_{\text{SOM}}^2$
Немес [20]	$x_1 = -3.663 + 0.046V_{\text{sand}}$ $x_2 = -0.887 + 0.083V_{\text{clay}}$ $x_3 = -9.699 + 6.451\rho_b$ $x_4 = -0.807 + 1.263V_{\text{SOM}}$ $z_1 = -0.428 + 0.998x_1 + 0.651x_1^2 + 0.130x_1^3$ $z_2 = 0.506x_1 - 0.188x_2 - 0.327x_3 - 0.094x_4$ $z_3 = -0.268 + 0.885z_1 + 0.544z_1^2 - 0.682z_1^3 + 0.320z_2 - 0.134z_1z_2 + 1.119z_1^2z_2 + 0.050z_2^2 - 0.645z_1z_2^2 + 0.160z_2^3 + 0.126x_4 - 0.144z_1x_4 - 0.372z_1^2x_4 + 0.247z_2x_4 + 0.795z_1z_2x_4 - 0.344z_2^2x_4 + 0.038x_4^2 - 0.071z_1x_4^2 + 0.020z_2x_4^2 - 0.015x_4^3$ $z_4 = 0.102 + 1.383z_3 + 0.302z_3^2 + 0.103z_3^3 + 0.331x_2 + 0.693z_3x_2 + 0.541z_3^2x_2 + 0.198x_2^2 + 0.429z_3x_2^2 + 0.092x_2^3 + 0.060x_3 + 0.277z_3x_3 + 0.417z_3^2x_3 + 0.242x_2x_3 + 0.929z_3x_2x_3 + 0.319x_2^2x_3 + 0.026x_3^2 + 0.094z_3x_3^2 + 0.116x_2x_3^2$ $\gamma_{\max} = 0.04167 \times 10^{(0.571 + 0.956z_4)}$
Томассела [28]	$\gamma_{\max} = 0.1(-4.994 + 0.56728V_{\text{sand}} - 0.131V_{\text{clay}} - 0.0127V_{\text{SOM}})$

по треугольнику Ферре в качестве пористости/содержания органического вещества почв использовались средние значения для каждого типа почвы. Поэтому анализ поведения ПТФ только на смоделированных данных не может быть полным.

Таким образом, выполнен второй этап работ – расчет гидрофизических характеристик с использованием выбранных ПТФ по данным из ГПН, описанного выше. Для этого исходный ГПН был переведен на пространственное разрешение 0.1°

на 0.1° с учетом площади каждой ячейки, так как исходное пространственное разрешение набора очень мелкое и, соответственно, размер файлов очень велик, что вызывает некоторые затруднения при расчетах. Для анализа брался только первый уровень (0–0.0451 м) глубины почвы, что соответствует поверхности. На рис. 5 представлено распределение почвенных фракций (гранулометрический состав) на поверхности по типам почв, полученных из этого набора. Отметим, что пори-

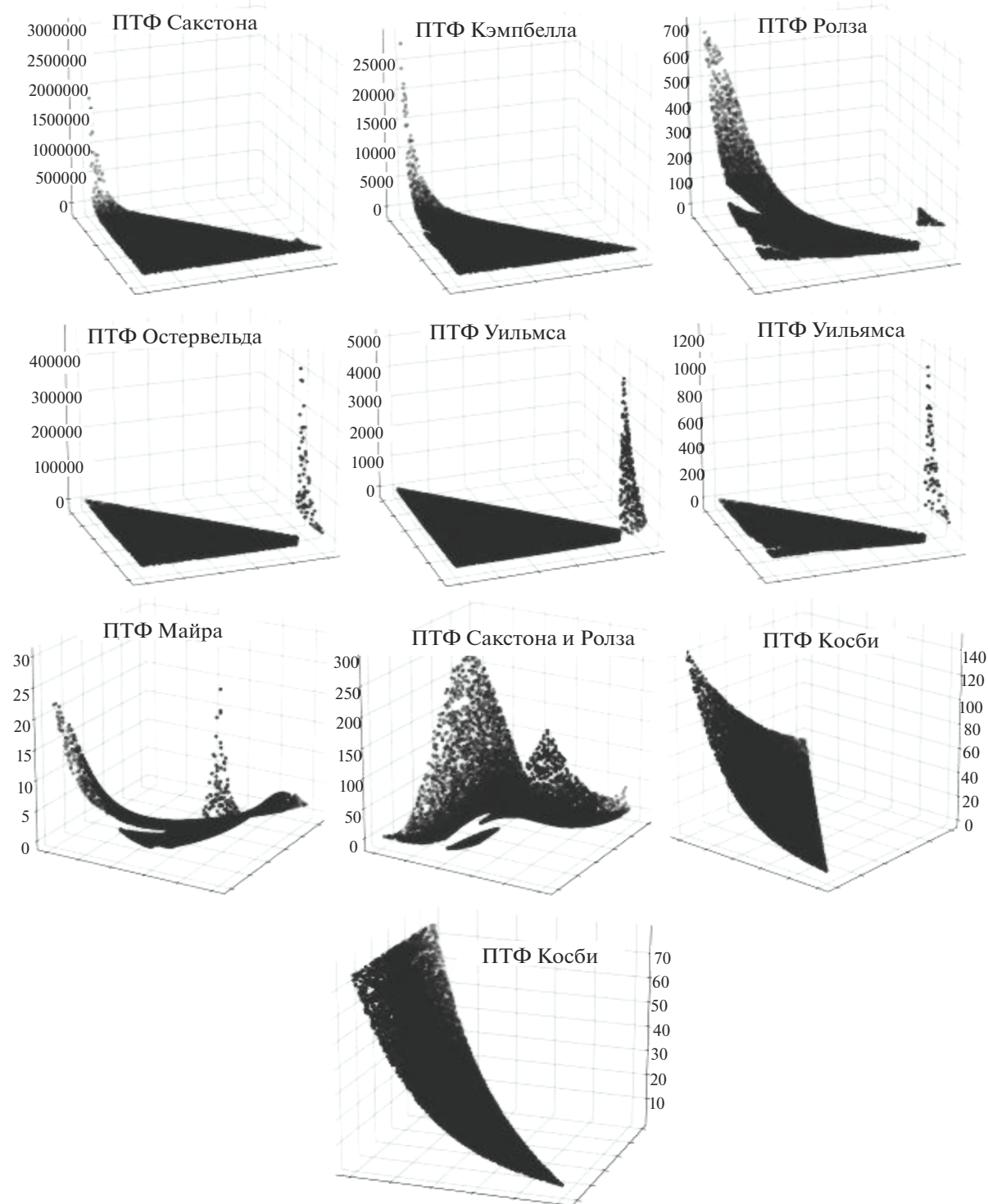


Рис. 3. Потенциал влаги при максимальном насыщении почвы (см), рассчитанный с использованием сгенерированной выборки значений гранулометрического состава по треугольнику Ферре. Значения осей x и y : V_{sand} и $V_{\text{clay}} \in (0; 100)$.

стость и содержание органического вещества почв в ГПН имеют свои уникальные значения для всего множества величин гранулометрических параметров.

На рис. 6, 7 представлены рассчитанные значения потенциала влаги гидравлической проводимости при максимальном насыщении почвы с использованием ПТФ по данным из ГПН.

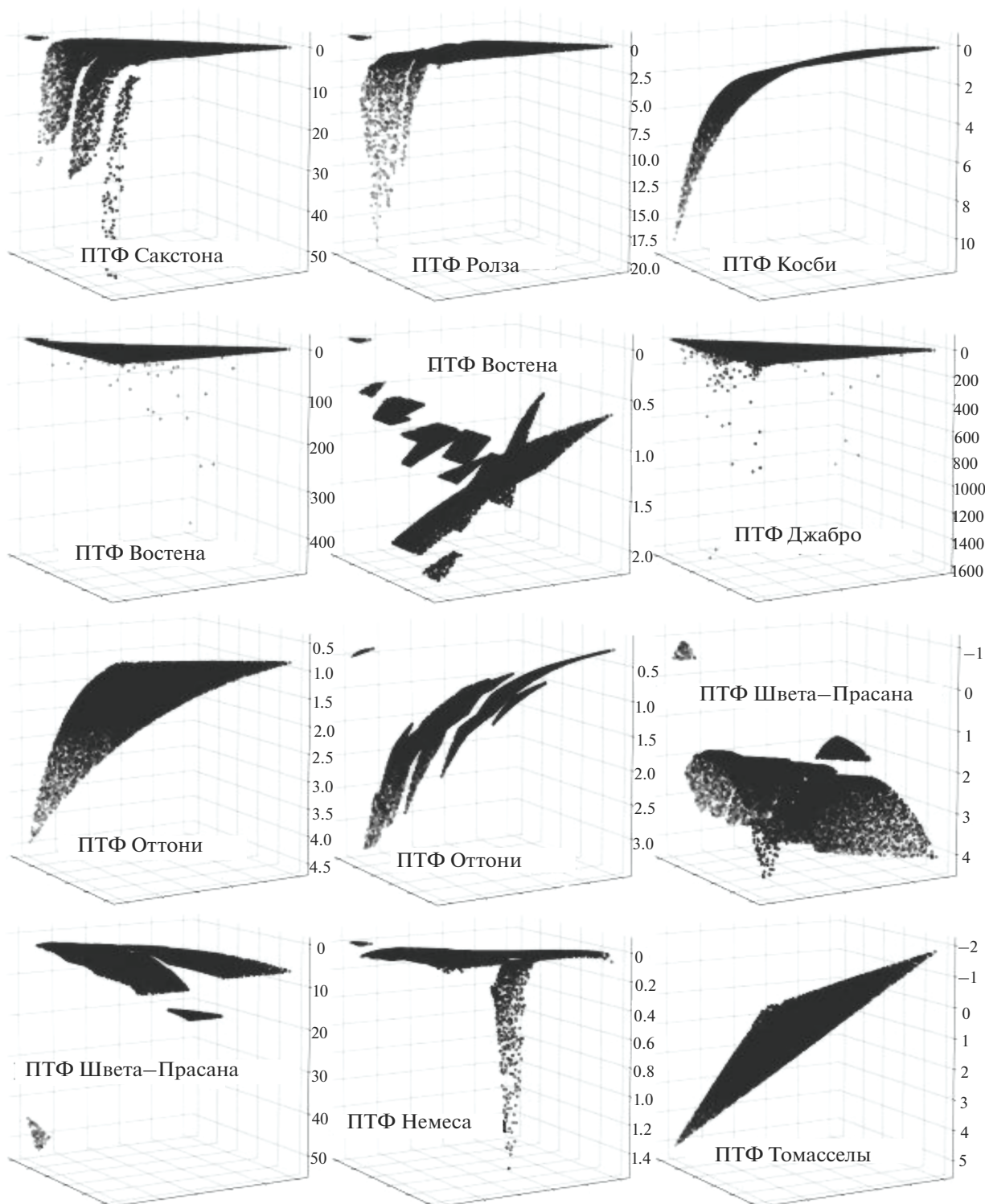


Рис. 4. Гидравлическая проводимость при максимальном насыщении почвы (см/ч), рассчитанная с использованием сгенерированной выборки значений гранулометрического состава по треугольнику Ферре. Значения осей x и y : V_{sand} и $V_{\text{clay}} \in (0; 100)$.

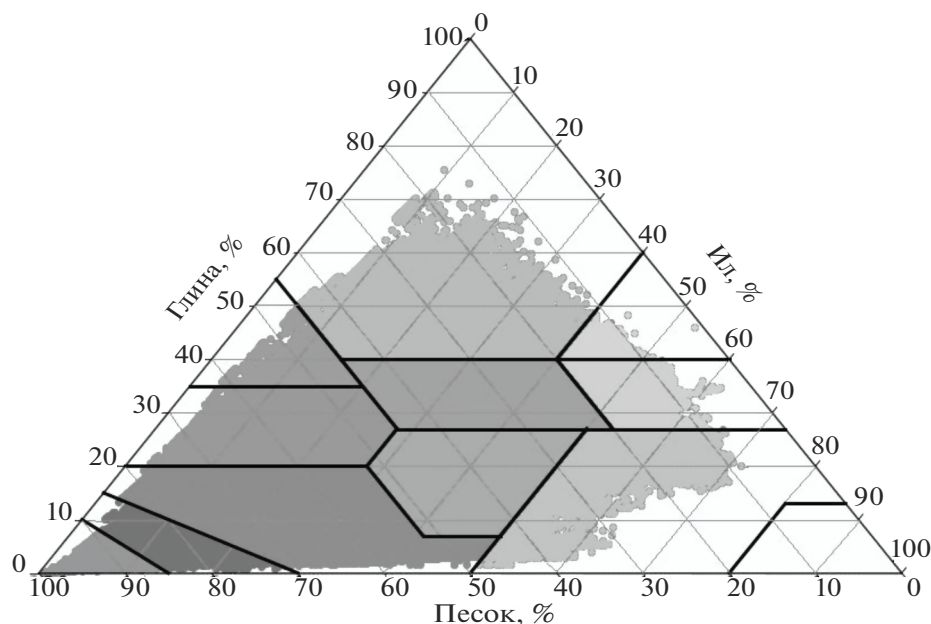


Рис. 5. Распределение почвенных фракций (гранулометрический состав) по треугольнику Ферре, взятых из глобального набора почвенных характеристик с пространственным разрешением $0.1^\circ \times 0.1^\circ$.

При сравнении результатов (потенциал влаги — рис. 3 и 6; гидравлическая проводимость — рис. 4 и 7) можно сделать следующие ниже выводы.

1. Прежде всего видно, что в первом варианте (рис. 3 и 4) графики гидрофизических характеристик, где ПТФ зависят не только от гранулометрического состава, но и от пористости/органического вещества почв, имеют линии разрыва. Возможно, это объясняется тем, что пористость/плотность и органическое вещество почв являются кусочно-разрывными функциями, так как представляют собой набор средних, определенных по треугольнику Ферре, для разных типов почв, при этом другие независимые аргументы для ПТФ (песок, глина, ил) являются непрерывными функциями во всей области определения. Графики ПТФ (рис. 6, 7), рассчитанные по данным ГПН, не имеют таких разрывов, так как пористость/органическое вещество почв представляют собой непрерывные функции, соответствующие изменению области определения других аргументов.

2. В первом и во втором случаях формы ПТФ (рис. 3, 6; рис. 4, 7) близки между собой, но шкалы и порядок значений различаются. Это может объясняться тем, что не все крайние значения гранулометрического состава есть в ГПН (рис. 2, 5).

3. Как в первом, так и во втором случаях ПТФ Сакстона, Кэмпбелла, Остервельда, Уильмса, Сакстона и Ролза (рис. 3, 6); Востена (только во втором случае), Джабро (рис. 4, 7) в крайних точ-

ках дают очень высокие значения гидрофизических характеристик по сравнению с другими ПТФ.

4. Графики для одной и той же гидрофизической характеристики имеют разную форму. В группу наиболее схожих по форме графиков можно отнести ПТФ Сакстона, Кэмпбелла, Ролза, Остервельда, Уильямса и Косби. Формы ПТФ Майра и Сакстона/Ролза отличаются от остальных. Оси на графиках по ПТФ Косби ориентированы по-другому для наглядности формы. Формы графиков для гидравлической проводимости более неоднородны. Наиболее схожи формы по ПТФ Сакстона, Ролза, Востена 1, Джабро, Оттони 2, Шветта—Прасана 2; Косби и Оттони 1. Графики по ПТФ Шветта—Прасана 1, Немеса, Томасселы отличаются от всех.

На основании проведенного анализа можно заключить, что не представляется возможности выбрать какую-либо одну ПТФ для расчета гидрофизических характеристик и использования ее в модели деятельного слоя суши. Поэтому проведем еще сравнение рассчитанных гидрофизических характеристик по ПТФ с данными гидрофизических характеристик, которые представлены в ГПН.

На рис. 8 представлены графики потенциала влаги и гидравлической проводимости при максимальном насыщении по данным из ГПН. Если сравнить их со значениями, полученными по различным ПТФ по данным ГПН, то можно отме-

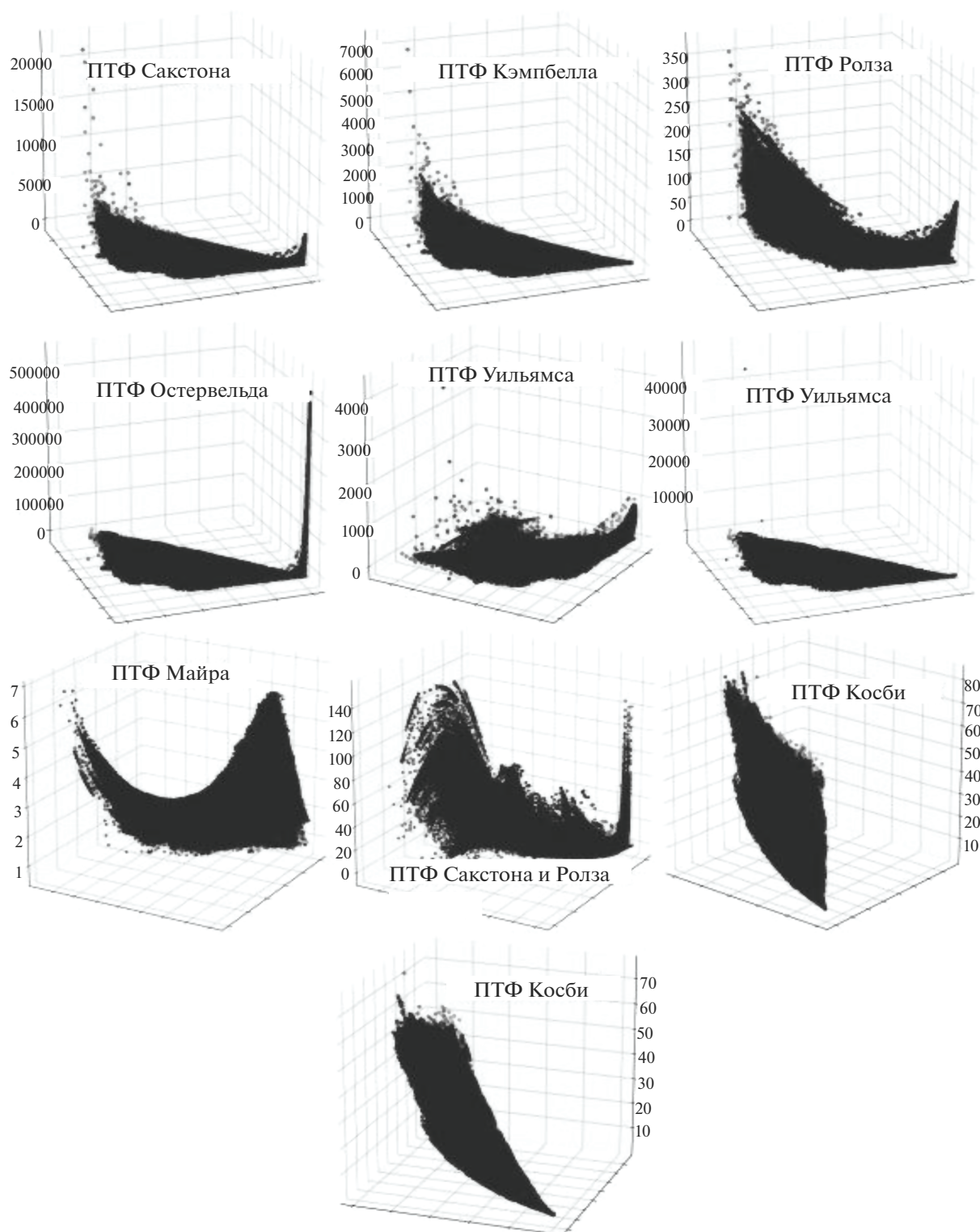


Рис. 6. Потенциал влаги при максимальном насыщении почвы (см), рассчитанный по данным из ГПН. Значения осей x и y : V_{sand} и $V_{\text{clay}} \in (0; 100)$.

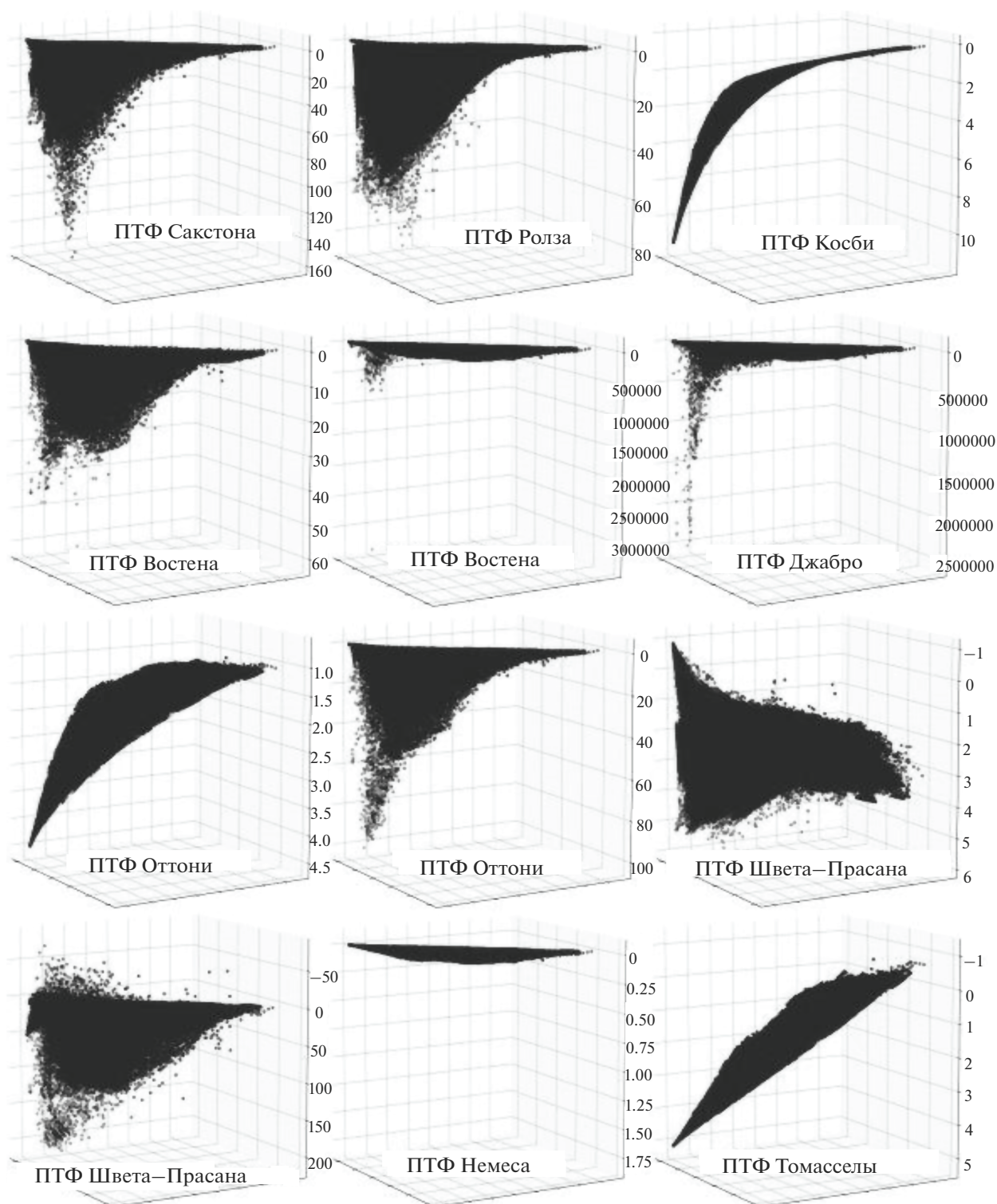


Рис. 7. Гидравлическая проводимость при максимальном насыщении почвы (см/ч), рассчитанная по данным из ГПН. Значения осей x и y : V_{sand} и $V_{clay} \in (0; 100)$.

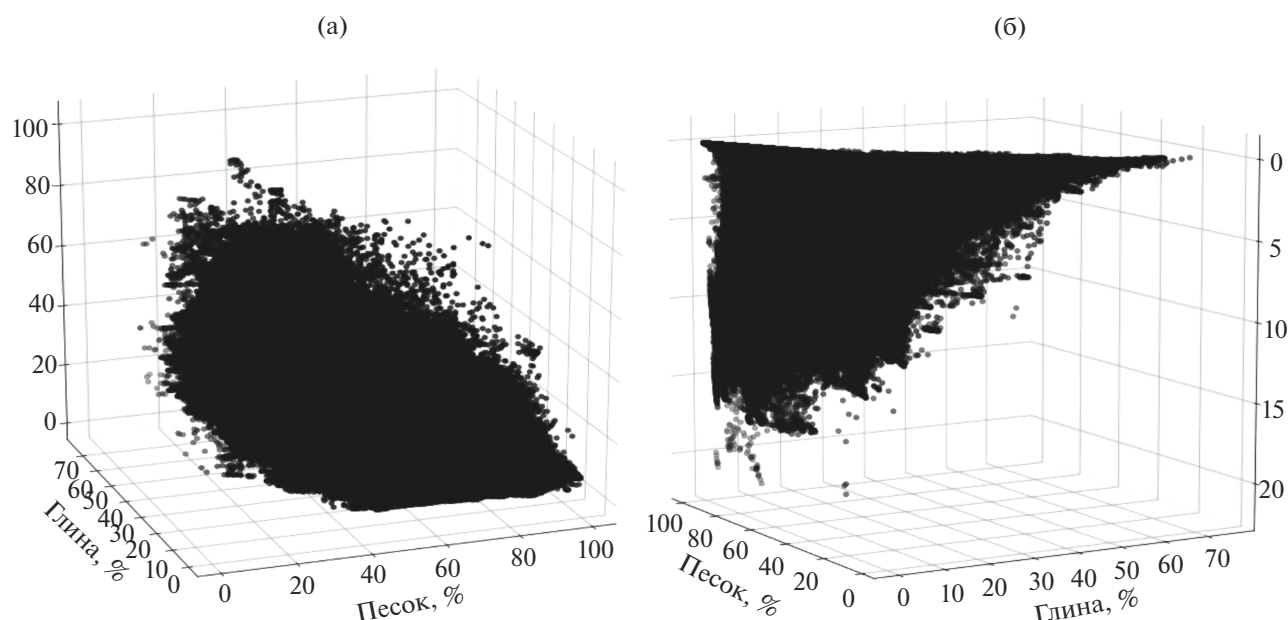


Рис. 8. Потенциал влаги (см) (а) и гидравлическая проводимость (см/ч) (б) при максимальном насыщении из ГПН.

тять, что форма некоторых ПТФ совпадает (ПТФ Сакстона, Ролза, Востена 1, Оттони 2 для гидравлической проводимости и ПТФ Сакстона, Кэмпбелла, Ролза, Уильямса и Косби 1, 2 для потенциала влаги). Но при сравнении значений различия достаточно большие, для потенциала влаги схожие по форме ПТФ дают очень высокие значения (например, максимальная величина по ПТФ Сакстона – 20000 см), в то же время потенциал влаги из ГПН ≤ 100 см. Для гидравлической проводимости схожие по форме ПТФ также дают завышенные значения по сравнению со значениями из ГПН (например, максимальная величина по ПТФ Востена 60 см/ч).

В качестве дополнения приведем статистические характеристики (табл. 3, 4) для гидрофизических характеристик, полученных с использованием выбранных ПТФ по сгенерированной выборке и по данным из ГПН, и для гидрофизических характеристик непосредственно из ГПН. Для сравнения двух статистических характеристик в качестве основных используются МЕ (средняя ошибка), МАЕ (средняя абсолютная ошибка), MRE (средняя относительная ошибка), RMSE (среднеквадратичная ошибка), СС (коэффициент корреляции Пирсона) и KGE (эффективность Клинга–Гупты). Аналогичные статистические характеристики для гидравлической проводимости представлены в табл. 5, 6.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В случае расчета ПТФ по сгенерированному множеству гранулометрического состава и средним значениям пористости и содержания органического вещества почв для каждого типа почвы по треугольнику Ферре вид ПТФ (наличие разрывов на графике) отличается от ПТФ, рассчитанных по данным, взятым из ГПН. Отсюда можно сделать вывод, что использование средних значений пористости или содержания органического вещества почв при расчете ПТФ может давать ошибку (недооценку) в значениях как потенциала влаги (соответственно и безразмерного показателя Клаппа–Хорнбергера), так и гидравлической проводимости.

ПТФ могут в принципе давать сильно завышенные значения как при каких-то крайних значениях гранулометрического состава, так и в общем. Отсюда можно сделать вывод, что использовать какую-то одну ПТФ в модели для расчета требуемых характеристик некорректно. Оптимальное решение – использование готовых и проверенных глобальных наборов почвенных характеристик, например ГПН, авторы которого используют специальные методики ансамблевого осреднения и минимизации для получения глобального поля гидрофизических характеристик.

Авторы выражают благодарность В.М. Степаненко (НИВЦ МГУ) и И.А. Репиной (ИФА РАН) за помощь в работе над статьей.

Таблица 3. Статистические характеристики для потенциала влаги, рассчитанного с помощью выбранных ПТФ по сгенерированной выборке и по данным из ГПН

ПТФ	Среднее значение $\Psi_{\max}$ (выборка)	Среднее значение $\Psi_{\max}$ (ГПН)	ско $\Psi_{\max}$ (выборка)	ско $\Psi_{\max}$ (ГПН)	ME	MAE	MRE	RMSE	KGE
Сакстон	1151.3	2791.7	1641.7	47796.4	1640.5	3757.2	142.5	4.79E + 04	-10.1
Кэмпбелл	48.1	228.6	63.4	788.2	180.5	198.9	375.4	811.1	-3.2
Ролз	59.8	63.8	50.0	63.0	4.0	56.8	6.7	80.6	0.0
Остервельд	1.68E+5	742.8	2.48E+5	1.01E+04	-1.67E+05	1.68E+05	-99.6	2.99E+05	-7.3
Уильямс	213.1	28.3	253.6	123.8	-184.8	199.1	-86.7	337.4	-2.0
Уильямс	132.4	17.3	174.6	38.5	-115.1	128.5	-86.9	212.7	-0.5
Майр	2.6	3.4	0.9	1.9	0.8	1.5	29.1	2.2	-0.2
Сакстон и Ролз	18.5	50.3	18.9	38.5	31.8	39.0	172.0	53.4	-1.0
Косби	13.2	31.8	10.2	18.7	18.5	21.5	139.8	28.2	-0.7
Косби	12.6	31.8	9.7	16.4	19.3	21.7	153.3	27.1	-0.9

Таблица 4. Статистические характеристики для потенциала влаги, рассчитанного с помощью выбранных ПТФ по данным из ГПН, и для потенциала влаги из ГПН

ПТФ	Среднее значение $\Psi_{\max}$ (ГПН)	ско $\Psi_{\max}$ (ГПН)	ME	MAE	MRE	RMSE	CC	KGE
Сакстон	2791.7	47796.4	1125.0	1138.2	4292.0	2000.6	-0.7	-42.0
Кэмпбелл	228.6	788.2	21.9	23.6	83.4	58.8	0.6	-0.2
Ролз	63.8	63.0	33.5	46.8	128.0	69.6	-0.4	-0.9
Остервельд	742.8	1.01E+04	1.7E+05	1.7E+05	6.4E+05	3.0E+05	-0.7	-6.4E+03
Уильямс	28.3	123.8	186.9	196.5	712.9	325.1	-0.6	-6.3
Уильямс	17.3	38.5	106.2	133.2	405.1	214.9	-0.6	-3.4
Майр	3.4	1.9	-23.6	23.6	-90.0	29.9	0.7	-0.1
Сакстон и Ролз	50.3	38.5	-16.8	20.8	-63.9	24.8	0.4	0.2
Косби	31.8	18.7	-13.0	13.3	-49.5	18.2	0.8	0.5
Косби	31.8	16.4	-13.6	14.1	-52.1	19.1	0.8	0.4
Среднее значение $\Psi_{\max}$ из ГПН	26.2							
ско $\Psi_{\max}$ из ГПН	19.1							

Таблица 5. Статистические характеристики для гидравлической проводимости, рассчитанной с помощью выбранных ПТФ по сгенерированной выборке и по данным из ГПН

ПТФ	Среднее значение $\gamma_{\max}$ (выборка)	Среднее значение $\gamma_{\max}$ (ГПН)	ско $\gamma_{\max}$ (выборка)	ско $\gamma_{\max}$ (ГПН)	ME	MAE	MRE	RMSE	KGE
Сакстон	1.8	1.2	5.7	3.9	−0.6	2.6	−34.7	6.9	−0.1
Ролз	1.9	0.4	5.0	1.2	−1.5	2.0	−77.5	5.3	−0.3
Косби	5.6	1.3	4.2	1.1	−4.3	4.6	−76.5	6.1	−0.3
Востен	1.2	2.6E+11	1.9	3.7E+14	2.6E+11	2.6E+1	2.1E+13	3.7E+14	−2.1E+11
Востен	47.7	1.1	4222.5	0.3	−46.6	47.9	−97.8	4222.7	−0.7
Джабро	419.9	3.3	13141.9	806.9	−416.6	422.4	−99.2	13173.2	−6.0
Оттони	2.8	1.4	1.3	0.5	−1.4	1.6	−50.1	2.0	−0.1
Оттони	1.6	1.1	2.9	0.5	−0.5	1.1	−29.2	3.0	−0.3
Швета—Прасана	1.1	2.2	1.4	0.7	1.1	1.4	99.2	1.9	−0.6
Швета—Прасана	20.8	4.4	23.0	3.9	−16.3	18.2	−78.7	28.5	−0.3
Немес	8.4E+24	0.0	1.2E+28	0.1	−8.4E+24	8.4E+24	−100.0	1.2E+28	−0.7
Томассела	3.2	1.0	1.6	1.2	−2.3	2.5	−70.6	3.0	−0.9

Таблица 6. Статистические характеристики для гидравлической проводимости, рассчитанной с помощью выбранных ПТФ по данным из ГПН, и для гидравлической проводимости из ГПН

ПТФ	Среднее значение $\gamma_{\max}$ (ГПН)	ско $\gamma_{\max}$ (ГПН)	ME	MAE	MRE	RMSE	CC	KGE
Сакстон	1.2	3.9	0.6	1.3	53.6	4.6E+00	0.7	−0.3
Ролз	0.4	1.2	0.8	1.2	65.9	4.0E+00	0.7	0.0
Косби	1.3	1.1	4.5	4.5	387.1	6.5E+00	−0.1	−3.1
Востен	2.6E+11	3.7E+14	0.0	0.8	4.1	1.9E+00	0.5	0.5
Востен	1.1	0.3	46.6	48.0	4048.1	4.2E+03	0.0	−70.1
Джабро	3.3	806.9	418.7	419.7	3.6E+04	1.3E+04	0.0	−363.6
Оттони	1.4	0.5	1.7	2.2	147.0	2.8E+00	−0.1	−0.9
Оттони	1.1	0.5	0.5	0.9	40.8	2.8E+00	0.4	0.2
Швета—Прасана	2.2	0.7	0.0	1.1	−4.3	1.5E+00	0.6	0.5
Швета—Прасана	4.4	3.9	19.6	20.2	1706.3	3.1E+01	−0.4	−16.1
Немес	0.0	0.1	8.4E+24	8.4E+24	7.3E+26	1.2E+28	0.0	−7.3E+24
Томассела	1.0	1.2	2.1	2.4	182.5	3.1E+00	0.0	−1.2
Среднее значение $\gamma_{\max}$ из ГПН	1.2							
ско $\gamma_{\max}$ из ГПН	1.7							

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев В.А., Володин Е.М., Галин В.Я., Дымников В.П., Лыков В.Н. Описание модели общей циркуляции атмосферы ИВМ РАН – версия 1997 года. М.: ИВМ РАН, 1997. 78 с.
2. Володин Е.М., Дианский Н.А., Гусев А.В. Воспроизведение современного климата с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана INMCM4.0 // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. С. 448–466.
3. Лыков В.Н., Палагин Э.Г. Динамика взаимосвязанного переноса тепла и влаги в системе атмосфера–почва // Метеорология и гидрология. 1978. № 8. С. 48–56.
4. Палагин Э.Г. Математическое моделирование агрометеорологических условий перезимовки озимых культур. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 191 с.
5. Травова С.В., Степаненко В.М., Медведев А.И., Толстых М.А., Богомолов В.Ю. Качество воспроизведения состояния почвы моделью деятельного слоя суши ИВМ РАН–МГУ в составе модели прогноза погоды ПЛАВ // Метеорология и гидрология. 2022. № 3. С. 5–24.
<https://doi.org/10.52002/0130-2906-2022-3-5-24>
6. Шеин Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во МГУ, 2005. 432 с.
7. Benham E., Ahrens R.J., Nettleton W.D. Clarification of Soil Texture Class Boundaries // National Soil Survey Center. L.: USDA-NRCS, 2009.
8. Bouma J., van Lanen H.A.J. Transfer functions and threshold values: from soil characteristics to land qualities. Washington: Int. Workshop Quantified Land Evaluation Procedures, 1986. P. 106.
9. Brakensiek D.L., Rawls W.J., Stephenson G.R. Modifying SCS hydrologic soil groups and curve numbers for rangeland soils // St. J. ASAE Paper. 1984. PNR-84-203.
10. Campbell G.S. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data // Soil Scinc. 1974. 117 (6). P. 311–314.
<https://doi.org/10.1097/00010694-197406000-00001>
11. Campbell G.S., Shiozawa S. Prediction of hydraulic properties of soils using particle-size distribution and bulk density data ed. M.Th. van Genuchten et al // Proc. Int. Workshop on Indirect methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils. Riverside: Univ. California, 1992. P. 317–328.
12. Clapp R.B., Hornberger M.G. Empirical equations for some soil hydraulic properties // Water Resour. Res. 1978. V. 14. № 4. P. 601–604.
13. Cosby B.J., Hornberger G.M., Clapp R.B., Ginn T.R. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of the soil // Water Resour. Res. 1984. V. 20. № 6. С. 682–690.
14. Dai Y., Xin Q., Wei N., Zhang Y., Shanguan W., Yuan H. et al. A global high-resolution data set of soil hydraulic and thermal properties for land surface modeling // Advances Modeling Earth Systems. 2019. V. 11. № 9. P. 2996–3023.
<https://doi.org/10.1029/2019MS001784>
15. Drozdov E.D., Stepanenko V.M., Voropay N.N., Dyukarev E.A., Kokoreva A.A., Cherkashina A.A., Bogomolov V.Yu. Parametrization of soil thermal conductivity in the INM RAS-MSU land surface model // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. V. 611. P. 1–5.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/611/1/012022>
16. Guber A.K., Pachepsky Ya.A. Multimodeling with Pedotransfer Functions. Documentation and User Manual for PTF Calculator (CalcPTF). Version 3.0. Environmental Microbial and Food Safety Laboratory Beltsville Agricultural Research Center. USDA-ARS. 2010.
17. Jabro J.D. Estimation of saturated hydraulic conductivity of soils from particle size distribution and bulk density data // Trans ASAE. 1992. V. 35. P. 557–560.
18. Mayr T., Jarvis N.J. Pedotransfer functions to estimate soil water retention parameters for a modified Brooks–Corey type model // Geoderma. 1999. V. 91. P. 1–9.
19. Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media // Water Resour. Res. 1976. V. 12 (3). P. 513–522.
<https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>
20. Nemes A., Rawls W.J., Pachepsky Y.A. Influence of organic matter on the estimation of saturated hydraulic conductivity // Soil Sci. Soc. Am. J. 2005. V. 69. P. 1330–1337.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0055>
21. Osterveld M., Chang C. Empirical relations between laboratory determination of soil texture and moisture characteristic // Can. Agric. Eng. 1980. V. 22. P. 149–151.
22. Ottoni M.V., Ottoni Filho T.B., Lopes-Assad M.L.R.C., Rotunno Filho O.C. Pedotransfer functions for saturated hydraulic conductivity using a database with temperate and tropical climate soils // J. Hydrol. 2019. V. 575. P. 1345–1358.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.050>
23. Saxton K.E., Rawls W.J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions // Soil Sci. Soc. 2006. V. 70. № 5. P. 1569–1578.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>
24. Saxton K.E., Rawls W.J., Romberger J.S., Papendic R.I. Estimating generalized soil- water characteristics from texture // Soil Sci. Soc. 1986. V. 50. № 4.
25. Shwetha P., Prasanna K. Pedotransfer functions for the estimation of saturated hydraulic conductivity for some Indian sandy soils // Eurasian Soil Sci. 2018. V. 51. P. 1042–1049.
<https://doi.org/10.1134/S1064229318090119>
26. Soil Science Division Staff. Soil survey sand / Eds C. Ditzler, K. Scheffe, H.C. Monger. Washington: Government Printing Office, 2017.
27. Soil survey manual. Washington: United States Department of Agriculture, 2018. P. 63–65.

28. *Tomasella J., Hodnett M.G.* Estimating unsaturated hydraulic conductivity of Brazilian soils using soil-water retention data // *Soil Sci.* 1997. V. 162. P. 703–12.
<https://doi.org/10.1097/00010694-199710000-00003>
29. *van Genuchten M.T.* A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils // *Soil Sci. Soc.* 1980. V. 44 (5). P. 892–898.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
30. *Williams J., Ross P., Bristow K.* Prediction of the Campbell water retention function from texture, structure, and organic matter / Eds *M.Th. van Genuchten et al.* // *Proc. Int. Workshop on Indirect methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils.* Riverside: Univ. California, 1992. P. 427–442.
31. *Wösten J.H.M., Lilly A., Nemes A., Bas C Le.* Development and use of a database of hydraulic properties of European soils // *Geoderma.* 1999. V. 90. I. 3–4. P. 169–185. ISSN 0016-7061.
[https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(98\)00132-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00132-3)
32. *Wösten J.H.M., Pachepsky Y.A., Rawls W.J.* Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics // *J. Hydrol.* 2001. V. 251. P. 123–150.
[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00464-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00464-4)