

**НАСЫЩЕННАЯ ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЧВ:
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И РАСЧЕТ С ПОМОЩЬЮ
ПЕДОТРАНСФЕРНЫХ ФУНКЦИЙ**

А. И. Мадн^{1,2}, Е. В. Шейн¹

¹*Московский государственный университет, факультет почвоведения, кафедра физики и мелиорации почв,
119991, Москва, Россия;*

²*Ain Shams University, Faculty of Agriculture, Soil Science Department,
11241, Cairo, Egypt*

E-mail: ahmed_mady@agr.asu.edu.eg

Поступила в редакцию 05 июня 2017 г., принята к печати 26 февраля 2018 г.

Насыщенная гидравлическая проводимость (коэффициент фильтрации, Кф) определялась в прямых лабораторных экспериментах на монолитах агродерново-подзолистой почвы (Umbric Albeluvisols Abruptic, WRB, 2006) и рассчитывалась с помощью педотрансферных функций (ПТФ) при высокой природной вариабельности фракций гранулометрического состава, плотности и содержания органического вещества в образцах почв. Для расчетного прогноза Кф предложено шесть классов ПТФ: Кф-1 (гранулометрические предикторы – содержание песка, пыли, глины), Кф-2 (песок, пыль, глина и плотность), Кф-3 (песок, пыль, глина, органическое вещество), Кф-4 (песок, пыль, глина, плотность, органическое вещество), Кф-5 (глина, плотность, органическое вещество), Кф-6 (песок, глина, плотность, органического вещества). Эффективность расчетов при помощи ПТФ была определена с использованием средней квадратической погрешности (RMSE), коэффициента детерминации (R²) и коэффициента геометрической средней ошибки (GMER). Результаты показали, что расчет с помощью ПТФ, разработанных на основе математических моделей с использованием нелинейной регрессии, является более эффективным способом вычисления Кф, чем прогноз по базе данных Rosetta (программа RETC). При использовании нелинейной регрессии экспоненциального вида и предикторов в виде гранулометрического состава и плотности (Кф-2) возникают наименьшие ошибки. Для адекватных расчетов Кф по физическим параметрам почв для конкретного региона рекомендуется создание собственной региональной базы данных и использование для ПТФ математических моделей нелинейной регрессии.

Ключевые слова: гидрология почв, фильтрация, нелинейная регрессия, тяжелосуглинистые агродерново-подзолистые почвы.

**SATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF SOILS: EXPERIMENTAL
DEFINITIONS AND CALCULATION BY MEANS OF PEDOTRANSFER FUNCTIONS**

A. I. Mady^{1,2}, E. V. Shein¹

¹*Moscow State University, Faculty of Soil Science,
Department of Physics and Melioration of Soils,
119991, Moscow, Russia;*

²*Ain Shams University, Faculty of Agriculture, Soil Science Department,
11241, Cairo, Egypt*

E-mail: ahmed_mady@agr.asu.edu.eg

Soil saturated hydraulic conductivity (Ks) is playing an important role in irrigation, drainage and soil water flow. Pedotransfer Functions (PTFs) are widely used for estimating soil hydraulic properties. The aim of the study was to validate PTFs using non-linear regression (NLR) for estimation of saturated hydraulic conductivity. Moreover, selection of the best predictor variables is used for PTFs determination. The combination of different soil physical properties as PTF model's independent variables has been tested. Six classes of PTFs were proposed using NLR: Ks-1 (Clay + Silt + Sand), Ks-2 (Clay + Silt + Sand + Bulk density), Ks-3 (Clay + Silt + Sand + Organic matter), Ks-4 (Clay + Silt + Sand + Bulk density + Organic matter), Ks-5 (Clay + Bulk density + Organic matter) and Ks-6 (Clay + Sand + Bulk density + Organic matter). Soil hydraulic conductivity was measured by a constant head method and predicted by proposed PTFs based on NRL. Determination coefficient (R²), Root Mean Square Error (RMSE) and Geometric mean error ratio (GMER) were used for estimating the efficiency of proposed

PTFs. The best proposed class developed by NLR was Ks-2, RMSE = 2.72×10^{-6} m s⁻¹ for silty loam and silty clay loam soil under study. Non-linear regression is more appropriate for predicting Ks than Rosetta database (RETC program). The efficiency of non-linear regression is based on the correlation coefficient between Ks and soil physical properties. Moreover, the application of developed PTFs using non-linear regression was suitable for calculating Ks.

Keywords: soil hydrology, filtration, non-linear regression model, clay loam sod-podzolic soils.

ВВЕДЕНИЕ

Гидрологические свойства почвы в значительной степени определяют доступность почвенной влаги для растений и перенос растворенных веществ, поэтому они используются при мелиоративных расчетах. В последние годы весьма активно развиваются разноцелевые математические модели, описывающие поведение влаги в почве. В указанных моделях почвенные гидрологические свойства представлены в основном насыщенной гидравлической проводимостью, или коэффициентом фильтрации (Кф), и основной гидрофизической характеристикой (ОГХ), или кривой водоудерживания. Данные важнейшие гидрофизические характеристики, в свою очередь, пытаются рассчитывать в виде педотрансферных функций. Термин *педотрансферные функции* (ПТФ) был введен Воута (1989). Он обозначает способ предсказания сложноопределяемых свойств почв на основании более простых, представленных в многочисленных базах данных. Так, ПТФ предназначаются для перевода традиционно измеряемых свойств почвы (таких как плотность, гранулометрический состав и содержание органического вещества) в гидравлические и теплофизические свойства, экспериментальное определение которых требует значительных затрат. ПТФ, применяемые для оценки насыщенной гидравлической проводимости КФ и других агрофизических характеристик, были разработаны с использованием в качестве предикторов гранулометрического состава почв, содержания органического углерода, плотности и эффективной пористости (Mady, Shein, 2016). Выделяются: 1) ПТФ, использующие измеренные проценты песка, пыли, глины, содержания органического вещества и плотности почв, чтобы обеспечить непрерывно изменяющиеся гидравлические свойства по текстурному треугольнику (Wosten et al., 1995); 2) ПТФ, разработанные с использованием регрессии

математических и статистических моделей (Wosten et al., 1999; Walczak et al., 2006); 3) ПТФ, разработанные на основе математических моделей с использованием линейной/нелинейной регрессии или метода нейронных сетей, как в известной программе RETC (Schaap et al., 2001). Цель данной работы заключалась в экспериментальном определении Кф и оценке адекватности различных ПТФ с помощью статистических методов на примере тяжелосуглинистых агродерново-подзолистых почв.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования являлись агродерново-подзолистые почвы (Зеленоградский стационар Почвенного института имени В. В. Докучаева, с. Ельдигино, Пушкинский район, Московская область). В ходе исследования из основных горизонтов агродерново-подзолистой почвы было отобрано 33 образца ненарушенного сложения из трех наиболее представительных почвенных профилей в пределах 20-метровой траншеи (разрезы 1, 2 и 3) на трех основных горизонтах с учетом варьирования их глубин: (1) горизонт А (0–30) см, который в пределах траншеи разделялся на Апах' – 0–10 см, палево-светло-серый Апах'' – 10–20(25) см, Апах''' – 20(25)–30(40) см – остаток прежней плантажной вспашки; (2) горизонт ЕL (30–40) с фрагментами горизонтов ВЕL и морфонами ВЕLh; (3) горизонт В/В1 (40–60) – иллювиальный тяжелосуглинистый текстурный горизонт, который залегает сплошным слоем на глубине 40(50)–60(65) см.

Морфологические исследования показали, что в пределах траншеи встречаются почвы с разной глубиной оподзоливания (от 30 до 40–50 см) (рис. 1). Кроме того, в пределах горизонтов выделялись разного рода морфоны соседних горизонтов или их сочетаний, что приводило к значительной вариабельности Кф, исследованного как в полевых, так и в лабораторных условиях.

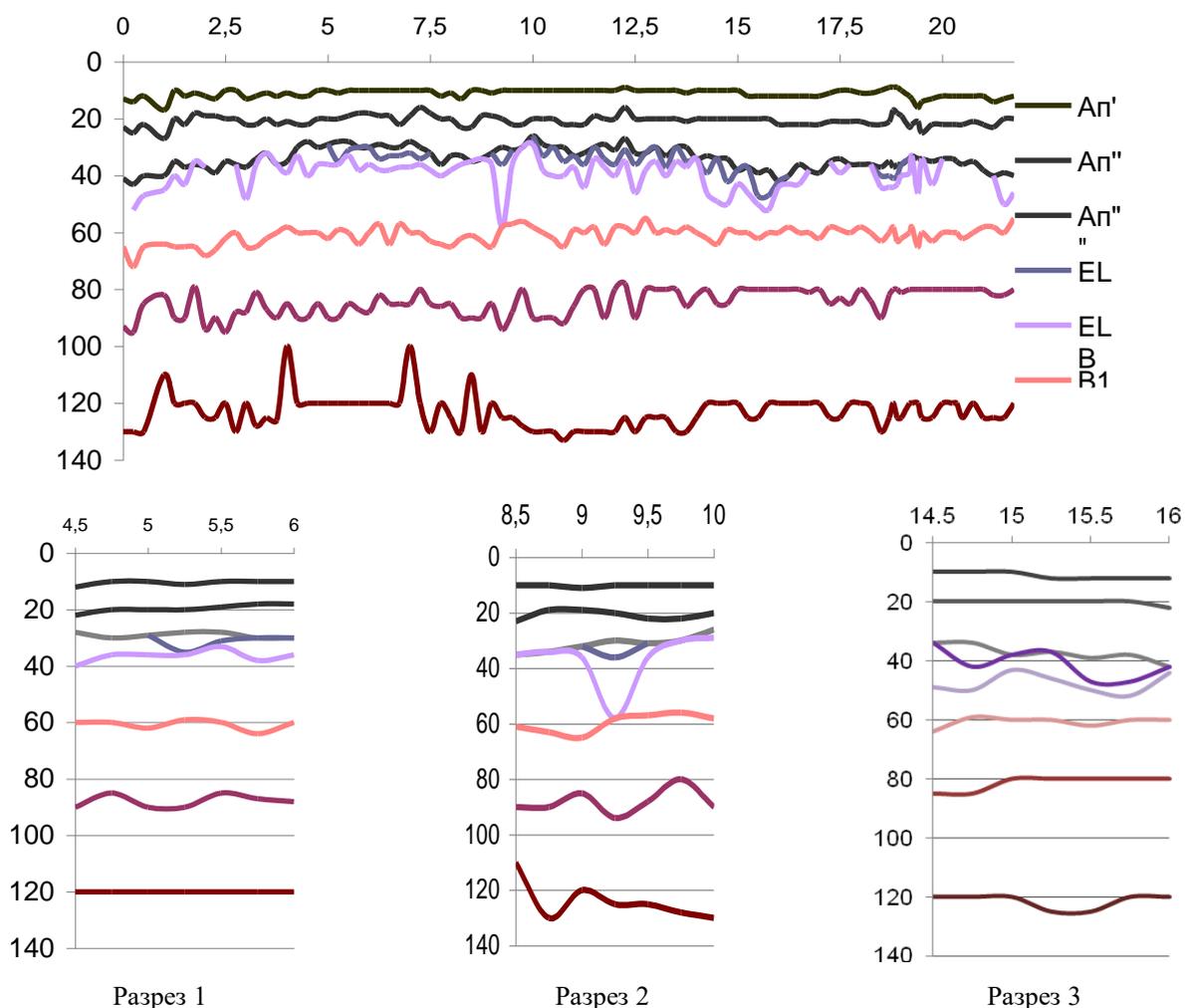


Рис. 1. Нижние границы генетических горизонтов в исследованной траншее агродерново-подзолистой почвы (А) и на ключевых разрезах 1, 2, 3.

По длине траншеи с шагом 40 см по поверхности почвы на глубинах 10, 20, 40 и 60 см были определены влажность, плотность и сопротивление пенетрации. В качестве примера на рис. 2 представлены топоизоплеты влажности в момент определения указанных свойств, которые характеризуют пространственное распределение данной физической величины, обусловленное различиями в физических свойствах горизонтов по профилю (глубине) агродерново-подзолистой почвы.

Помимо варьирования плотности, влажности и твердости почвы в траншее была исследована изменчивость впитывания влаги (Квп) в почву методом трубок

постоянного напора. Полученные результаты свидетельствуют о весьма высокой пространственной вариабельности указанных свойств: размах Квп по полевым определениям составлял от $5.1E-07$ до $2.6E-05$ м с⁻¹ при квартилях $1.0E-06$ и $8.8 E-06$ и медиане $2.5E-06$ м с⁻¹. Установлено, что для коэффициента впитывания характерно логнормальное распределение, приближающееся при логарифмировании к нормальному, а зависимости Квп от плотности и сопротивления пенетрации близки к экспоненциальным при недостоверных параметрах аппроксимации для полученного объема данных (около 230 дат) по исследованной почве.

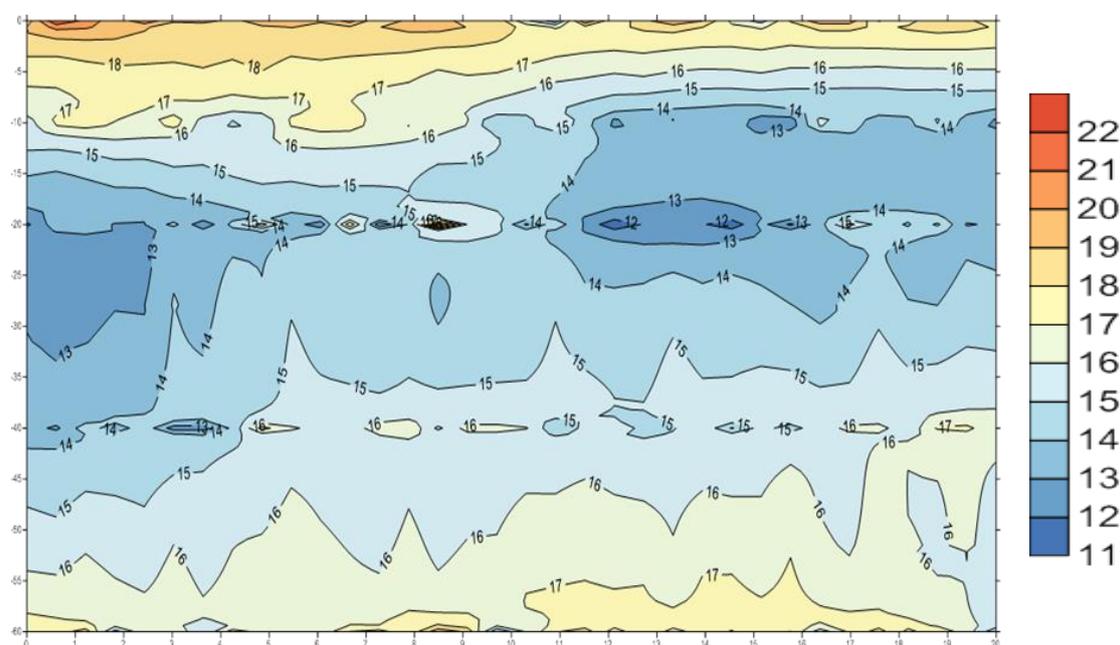


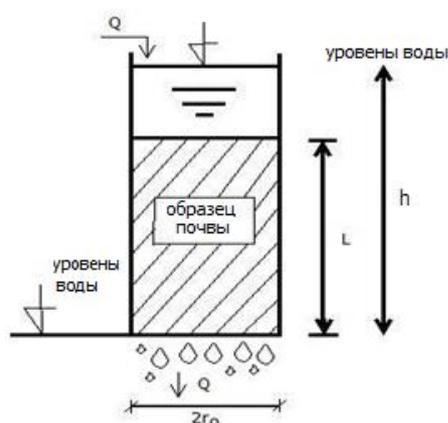
Рис. 2. Топоизоплеты влажности (%) агродерново-подзолистой почвы в профиле транsekты. Зеленоградский опорный пункт, Московская область

Гранулометрический состав почв определялся седиментационным методом с диспергированием в 4%-ном пиррофосфате натрия. Содержание органического углерода в почве определялось методом сухого сжигания, содержание углерода (С, %) пересчитывалось в содержание органического вещества: $O.V. (\%) = C\% \cdot 1,72$ (табл. 1).

Насыщенная гидравлическая проводимость (K_ϕ) определялась в лабораторных условиях на монолитах методом постоянного напора в соответствии с международными стандартами (Klute, Dirksen, 1986).

Таблица 1. Статистические характеристики некоторых свойств агродерново-подзолистой почвы.

Физические параметры почвы, %	Среднее	Минимум	Максимум	Стандартное отклонение
Песок (> 0,05 мм)	4,15	0,1	8,42	2,47
Пыль (0,002–0,05) мм	70,33	64,78	76,30	3,10
Глина (< 0,002 мм)	25,51	17,8	33,22	4,28
Плотность, $г\ см^{-3}$	1,35	1,10	1,49	0,10
Содержание органического вещества (О.В., %)	1,50	0,34	3,28	0,88



$$\frac{Q}{A \cdot t} = K_\phi \cdot \frac{\Delta H}{l}$$

где K_ϕ – насыщенная гидравлическая проводимость [м/с]; Q – объем воды, проходящей через почву [$м^3$] во время t [с]; A – площадь поперечного сечения почвенного столба [$м^2$]; $\Delta H/l$ – гидравлический градиент [-].

Модели ПТФ были разработаны с использованием нелинейной регрессии, основанной на физических свойствах почв. Физические свойства почвы (предикторы)

определялись содержанием песка, пыли, глины, органического вещества (ОВ) и ее плотностью. Образцы почвы были случайным образом разделены на два массива: 1) 20 образцов для создания ПТФ и 2) 13 образцов для тестирования эффективности расчета с помощью ПТФ.

$$\begin{aligned} \text{Кф-1} &= 7,18 \cdot 10^{-10} \cdot \exp(-0,069 \cdot \text{глина} + 0,12 \cdot \text{песок} + 0,136 \cdot \text{пыль}); \\ \text{Кф-2} &= 2,23 \cdot 10^{-7} \cdot \exp(-0,0517 \cdot \text{глина} + 0,0927 \cdot \text{песок} + 0,102 \cdot \text{пыль} - 2,757 \cdot \text{плотность}); \\ \text{Кф-3} &= 3,466 \cdot 10^{-9} \cdot \exp(-0,0517 \cdot \text{глина} + 0,0927 \cdot \text{песок} + 0,102 \cdot \text{пыль} + 0,323 \cdot \text{О.В}); \\ \text{Кф-4} &= 2,49 \cdot 10^{-7} \cdot \exp(-2,2 \cdot \text{плотность} + 0,26 \cdot \text{О.В} - 0,0414 \cdot \text{глина} + 0,0742 \cdot \text{песок} + 0,0816 \cdot \text{пыль}); \\ \text{Кф-5} &= 1,37 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-3,67 \cdot \text{плотность} + 0,43 \cdot \text{О.В} - 0,069 \cdot \text{глина}); \\ \text{Кф-6} &= 1,7 \cdot 10^{-4} \cdot \exp(-2,75 \cdot \text{плотность} + 0,32 \cdot \text{О.В} - 0,0517 \cdot \text{глина} + 0,092 \cdot \text{песок}), \end{aligned}$$

где Кф – насыщенная гидравлическая проводимость [м с^{-1}]; плотность почв [г см^{-3}]; ОВ – содержание органического вещества (ОВ, %); фракции песка, пыли, глины [массовый %].

Таблица 2. Определение классов ПТФ, оцененных с помощью нелинейной регрессии (NLR)

ПТФ	Параметры	Метод
Кф-1	Песок, пыль, глина	NLR
Кф-2	Песок, пыль, глина, плотность	NLR
Кф-3	Песок, пыль, глина, ОВ	NLR
Кф-4	Песок, пыль, глина, плотность, ОВ	NLR
Кф-5	Глина, плотность, ОВ	NLR
Кф-6	Песок, глина, плотность, ОВ	NLR
Кф-1а	Песок, пыль, глина	RETС (база данных Rosetta) (а)
Кф-2а	Песок, пыль, глина, плотность	RETС (база данных Rosetta) (б)

Эффективность расчета с помощью педотрансферных функций (ПТФ) определена с использованием коэффициента детерминации (R^2), средней квадратической погрешности ($RMSE$), средней ошибки (ME) и коэффициента геометрической средней ошибки ($GMER$):

$$\begin{aligned} R^2 &= 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}, \\ RMSE &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}}, \\ ME &= \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}, \end{aligned}$$

где y_i – измеренное значение; \hat{y}_i – прогнозируемое значение; \bar{y}_i – среднее измеренное значение y ; N – общее число наблюдений; ME – показатель точности

Нелинейная регрессия (NLR) была использована для моделирования Кф [м с^{-1}] на основе анализа физических свойств. Были предложены и проанализированы шесть различных классов ПТФ (Кф-1 – Кф-6) для оценки Кф в виде следующих уравнений:

оценки, который отражает тенденцию ПТФ к переоценке значений (если положительный) или недооценке (если отрицательный), тогда как $RMSE$ количественно определяет дисперсию измеренных и оцененных значений. Коэффициент геометрической средней ошибки ($GMER$) рассчитывался по коэффициенту ошибок (r_k) и измеренной насыщенной гидравлической проводимости ($(k_s)_p$) в сравнении с прогнозируемыми значениями насыщенной гидравлической проводимости ($(k_s)_m$):

$$\begin{aligned} r_k &= \frac{(k_s)_p}{(k_s)_m}, \\ GMER &= \exp\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(r_k)\right] \end{aligned}$$

$GMER$, равный 1, точно соответствует измеренной и прогнозируемой насыщенной гидравлической проводимости;

$GMER < 1$ указывает, что предсказанные значения, как правило, недооцениваются;

$GMER > 1$ указывает на превышение прогнозных значений над реальными.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Из табл. 3 видно, что эффективность ПТФ-метода зависит от набора свойств почвы, которые используются в ПТФ в качестве предикторов для прогноза Кф. Коэффициент корреляции (R) между насыщенной гидравлической проводимостью и каждым из конкретных компонентов почвы (песком, пылью, глиной, органическим веществом), а также ее плотностью составляет 0,76, 0,45, – 0,77, 0,42 и – 0,69 соответственно. Безусловно, важнейшими физическими параметрами, влияющими на насыщенную гидравлическую проводимость, являлись содержание песка, глины и плотность почвы (0,76, –0,77 и –0,69 соответственно), тогда как содержание пыли и органического вещества оказало на нее наименьшее влияние (0,45 и 0,42 соответственно). Полученные результаты согласуются с опубликованными ранее (Shein et al., 2015).

Оптимальным классом для расчета был класс КФ-2 (где $R^2 = 0,95$ и $RMSE = 2,72 \cdot 10^{-6}$, $ME = 7,42 \cdot 10^{-12}$, $GMER = 1,09$), основанный на определенном соотношении песка, пыли, глины и плотности почвы. Из рис. 3 следует, что к наилучшим из предлагаемых классов ПТФ следует отнести Кф-2п, Кф-3, Кф-1, Кф-6, Кф-4 и Кф-5 в соответствии с наименьшими значениями для R^2 , $RMSE$, ME и $GMER$. Наименее оптимальным классом оказался Кф-5, где $R^2 = 0,55$ и $RMSE = 6,11 \cdot 10^{-6}$,

$ME = 3,74 \cdot 10^{-11}$, $GMER = 1,21$, поскольку он основан на содержании песка, пыли, глины и органического вещества.

На рис. 3 представлена статистика разницы между измеренными (экспериментальными) Кф и вычисленными значениями (Δ Кф) для каждого класса. При этом наименьшая разница характеризует Кф-2, а наибольшая – Кф-5. Для определения эффективности применения ПТФ по сравнению с программой Rosetta, которая использовалась для тех же целей, сравнили $RMSE$ и ME для Кф-1 и Кф-2, вычисленных с помощью ПТФ, и для Кф-1а и Кф-2а, вычисленных с помощью программы Rosetta (Schaap, Leij, van Genuchten, 2001). Результаты показали, что значения $RMSE$ и ME для Кф-1 и КФ-2 меньше, чем значения $RMSE$ и ME для Кф-1а и КФ-2а. Следовательно, расчет с помощью ПТФ, разработанных при помощи математических моделей с использованием нелинейной регрессии, является более эффективным способом вычисления Кф, чем прогноз по базе данных Rosetta. Класс ПТФ в большей степени зависит от песка, глины и плотности почвы, чем от песка, пыли и глины, вычисленного с помощью нелинейной регрессии. Последнее связано с явлением полной мультиколлинеарности, т.е. наличием линейной зависимости между предикторами (песок, пыль, глина), что приводит к неопределенности параметров регрессионной модели и снижению эффективности её использования.

Таблица 3. Коэффициенты детерминации (R^2), средняя квадратическая погрешность ($RMSE$), средняя ошибка (ME) и коэффициент геометрической средней ошибки ($GMER$) для различных классов ПТФ

Класс ПТФ	Статистический проматры			
	R^2	$RMSE$	ME	$GMER$
Кф-1	0,9	$2,85 \cdot 10^{-6}$	$8,17 \cdot 10^{-12}$	1,16
Кф-2	0,95	$2,72 \cdot 10^{-6}$	$7,42 \cdot 10^{-12}$	1,09
Кф-3	0,90	$2,8 \cdot 10^{-6}$	$7,84 \cdot 10^{-12}$	1,15
Кф-4	0,85	$3,14 \cdot 10^{-6}$	$9,88 \cdot 10^{-12}$	1,17
Кф-5	0,55	$6,11 \cdot 10^{-6}$	$3,74 \cdot 10^{-11}$	1,21
Кф-6	0,88	$3,11 \cdot 10^{-6}$	$9,63 \cdot 10^{-12}$	1,12
Кф-1а	0,45	$3,98 \cdot 10^{-6}$	$1,59 \cdot 10^{-11}$	–
Кф-2а	0,78	$3,48 \cdot 10^{-6}$	$1,22 \cdot 10^{-11}$	–

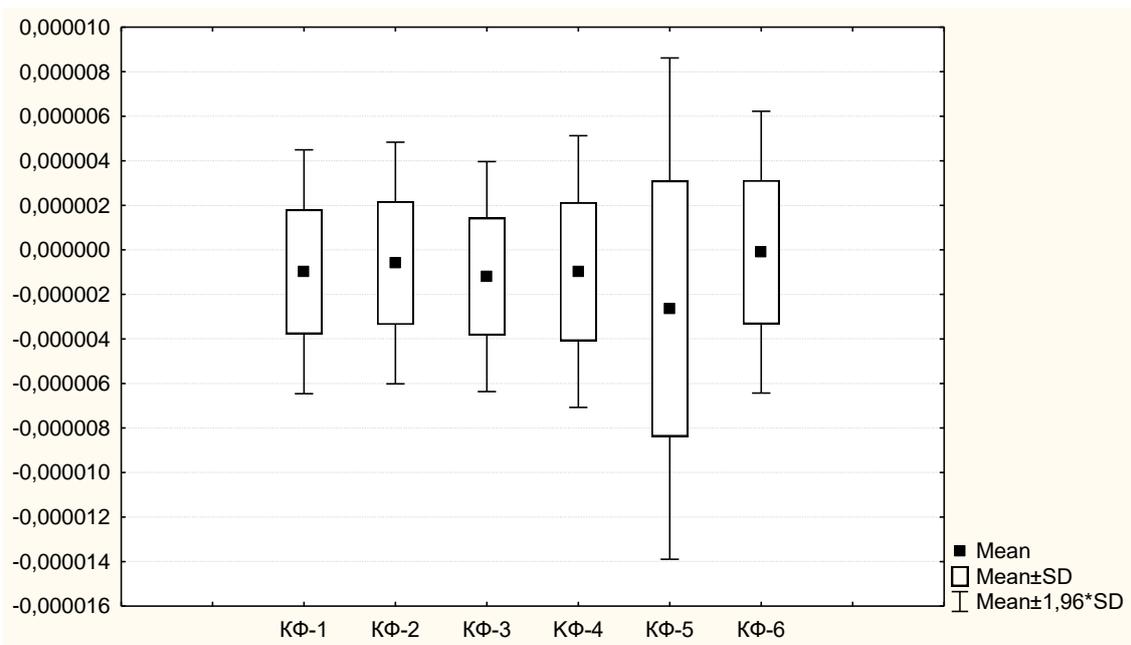


Рис. 3. Статистика разницы между измеренными и вычисленными по ПТФ коэффициентами фильтрации

ВЫВОДЫ

Результаты проведенного исследования позволяют сделать вывод, что ПТФ являются мощным инструментом оценки насыщенной гидравлической проводимости. При этом эффективность ПТФ-метода зависит от направления и степени отношений между насыщенной гидравлической проводимостью и физическими свойствами почвы, которые используются в ПТФ для прогноза Кф.

К важнейшим физическим параметрам, влияющим на насыщенную гидравлическую проводимость, следует отнести содержание песка, глины и плотность почвы, тогда как содержание пыли и органического вещества оказывает на нее наименьшее влияние. Расчет с помощью ПТФ, разработанных с использованием математических моделей нелинейной регрессии, является более эффективным способом вычисления Кф, чем прогноз по базе данных Rosetta. Для адекватных расчетов Кф по физическим параметрам почв при гидрологических исследованиях в конкретном регионе рекомендуется создание собственной региональной базы данных и использование для ПТФ математических моделей нелинейной регрессии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Bouma J. Using soil survey data for quantitative land evaluation // *Advances in Soil Science*, 1989, no. 9, pp. 177–213.
- Klute A., Dirksen C. Hydraulic conductivity of saturated soils // *Methods of Soil Analysis* / Klute A. (Ed.), 1986, ASA&SSSA, Madison, Wisconsin, USA, pp. 694–700.
- Mady A. Y., Shein E. V. Modeling soil thermal diffusivity as a function of soil moisture // *Bulletin of the Orenburg State University*, 2016, v. 200, no. 12, pp. 56–60.
- Schaap M. G., Leij F. J., van Genuchten M. T. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions // *Journal of Hydrology*, 2001, no. 251, pp. 163–176.
- Shein E.V., Mady A.Y., El Hassna A.M. Soil Saturated Hydraulic Conductivity Assessment by Direct and Pedotransfer Functions Methods // *Biogeosystem Technique Journal*, 2015, v. 6, no. 4, pp. 396–400.
- Walczak R. T., Moreno F., Salwinski C., Fernandez E., Arrue J. L. Modeling of Soil Water retention curve using Soil Solid phase parameters // *J. Hydrology*, 2006, v. 329, no. 3–4, pp. 527–533.
- Wösten J. H. M., Finke P. A., Jansen M. J. W. Comparison of class and continuous pedotransfer functions to generate soil hydraulic characteristics // *Geoderma*, 1995, no. 66, pp. 227–237.
- Wosten J. H., Lilly A., Nemes A., Le Bas C., Wosten J. H. M., Otto H. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils // *Geoderma*, 1999, v. 90, no. 3–, pp. 169–185.

REFERENCES

- Bouma J. Using soil survey data for quantitative land evaluation // *Advances in Soil Science*, 1989, no. 9, pp. 177–213.
- Klute A., Dirksen C. Hydraulic conductivity of saturated soils // *Methods of Soil Analysis* / Klute A. (Ed.), 1986, ASA&SSSA, Madison, Wisconsin, USA, pp. 694–700.
- Mady A. Y., Shein E. V. Modeling soil thermal diffusivity as a function of soil moisture // *Bulletin of the Orenburg State University*, 2016, v. 200, no. 12, pp. 56–60.
- Schaap M. G., Leij F. J., van Genuchten M. T. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions // *Journal of Hydrology*, 2001, no. 251, pp. 163–176.
- Shein E. V., Mady A. Y., El Hassna A. M. Soil Saturated Hydraulic Conductivity Assessment by Direct and Pedotransfer Functions Methods // *Biogeosystem Technique Journal*, 2015, v. 6, no. 4, pp. 396–400.
- Walczak R. T., Moreno F., Salwinski C., Fernandez E., Arrue J. L. Modeling of Soil Water retention curve using Soil Solid phase parameters // *J. Hydrology*, 2006, v. 329, no. 3–4, pp. 527–533.
- Wösten J. H. M., Finke P. A., Jansen M. J. W. Comparison of class and continuous pedotransfer functions to generate soil hydraulic characteristics // *Geoderma*, 1995, no. 66, pp. 227–237.
- Wosten J. H., Lilly A., Nemes A., Le Bas C., Wosten J.H.M., Otto H. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils // *Geoderma*, 1999, v. 90, no. 3–4, pp. 169–185.