

22 – 27
НОЯБРЯ

МОСКВА,
РОССИЯ

МЕЖДУНАРОДНАЯ
МОЛОДЕЖНАЯ
ШКОЛА
И КОНФЕРЕНЦИЯ

по вычислительно-
информационным
технологиям для наук
об окружающей среде



Памяти члена-
корреспондента
РАН
Василия
Николаевича
Лыкосова

Моделирование тепловлагопереноса в деятельном слое суши с использованием различных параметризаций для потенциала влаги, гидравлического потока и коэффициента влагопроводности с учетом различных педотрансферных функций и дискретизации органического и минерального состава по глубине.

Рязанова А.А.¹, Богомолов В.Ю.^{1,2}, Дюкарев Е.А.^{1,6}, Степаненко В.М.^{3,4,5,6}

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Россия, Томск

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова, Россия, Москва,

³Научно-исследовательский вычислительный центр, Московский государственный университет, Россия, Москва,

⁴Факультет географии, Московский государственный университет, Россия, Москва,

⁵Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Россия, Москва

⁶Югорский государственный университет, Россия, Ханты-Мансийск.

Почва в модели земной поверхности ИВМ РАН

дисперсная система (капиллярнопористое тело), состоящая из 5 компонент: минеральная часть, воздух в поровом пространстве и вода в 3 фазовых состояниях — жидкая влага, лед, водяной пар. Температура почвы $T, ^\circ\text{C}$, считается одинаковой для всех компонент. Влагосодержание характеризуют величины W, V, I , задающие весовую влажность — отношение массы жидкой влаги/водяного пара/льда, находящихся в поровом пространстве почвы, к массе абсолютно сухой почвы.

$$c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_T \left(\frac{\partial T}{\partial z} + \delta_W^T \frac{\partial W}{\partial z} + \delta_V^T \frac{\partial V}{\partial z} \right) \right] + L_f F_f - L_e F_e,$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_W \left(\frac{\partial W}{\partial z} + \delta_T^W \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial \gamma}{\partial z} - F_f - F_e - U - Y_g,$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_V \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \delta_T^V \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + F_e,$$

$$\frac{\partial I}{\partial t} = F_f,$$

$$T(0, t) = T_s(t), \quad T(h_{bot}, t) = T_b, \quad T(z, t_0) = T_0(z),$$

$$\lambda_W \frac{\partial W}{\partial z} \Big|_{z=0} = B_W, \quad \lambda_W \frac{\partial W}{\partial z} \Big|_{z=h_{bot}} = Y_{g,deep}, \quad W(z, t_0) = W_0(z),$$

$$V(0, t) = V_s, \quad V(h_{bot}, t) = V_b, \quad V(z, t_0) = V_0(z),$$

Подход определения параметров удержания влаги:

- Подход Брукса-Кори (Brooks and Corey, 1964)
 - устанавливает степенную зависимость между объёмным содержанием воды в почве θ и капиллярным давлением h в виде:

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\varphi - \theta_r} = \begin{cases} \left(\frac{h_b}{h}\right)^\lambda, & h > h_b, K(h) = K_s \left(\frac{\theta}{\varphi}\right)^{3+2/\lambda} \\ 1, & h \leq h_b \end{cases}$$

φ – пористость грунта, см³/см³; θ_r - остаточная влажность, см³/см³; h_b - давление воздуха, или «давление пузырей» почвы или пористого материала, λ – индекс распределения пор по размерам, K_s - гидравлический поток; см/день.

- Подход ван Генухтена-Муалема (Mualem 1976; van Genuchten, 1980)

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\varphi - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^{1-1/n}, K = K_s \Theta^{1/2} [1 - (1 - \Theta^{1/(1-1/n)})^{1-1/n}]^2$$

α – величина, обратно пропорциональная давлению входа воздуха, 1/см³; n – индекс распределения пор по размерам, характеризующий наклон Θ

Педотрансферная функция (ПТФ)

- **ПТФ** – это эмпирические зависимости, позволяющие восстанавливать основные гидрофизические функции почв, – прежде всего, основную гидрофизическую характеристику Θ (ОГХ), а также гидравлический поток K_s – на основе базовых свойств почв (Шеин, Карпачевский, 2003).
- **ПТФ** описывают зависимость гидродинамических характеристик с гранулометрическим составом почвы (минеральных и органогенных) (Korus, 2007; Wiess, 1998).
- В настоящее время существует огромное количество **ПТФ**, выведенных почвоведом для различного состава почвы.

Table 1. List of PTFs with input soil properties

#	PTF	Region	Number of samples	Model	Sand %	Silt %	Clay %	OC %	BD g cm ⁻³	Depth cm
1	Saxton et al., 1986	USA, nationwide	5320	BC	+		+		+	
2	Campbell and Shiosawa, 1992	No particular	6 soils	BC	+		+		+	
3	Rawls and Brakensiek, 1985	USA, nationwide	5320	BC	+		+		+	
4	Williams et al., 1992	Australia	196	BC	+		+		+	
5	Williams et al., 1992	Australia	196	BC	+		+	+	+	
6	Oosterveld and Chang, 1980	Canada, Alberta	298	BC	+		+		+	+
7	Mayr and Jarvice, 1999	UK	306	BC	+	+	+	+	+	
8	Wösten et al., 1999	Europe	4030	VG	+	+	+		+	+
9	Varallyay et al., 1982	Hungary	230	VG			+		+	
10	Vereecken et al., 1989	Belgium	182	VG	+		+	+	+	
11	Wösten et al., 1999	Europe	4030	VG		+	+	+	+	+
12	Tomasella and Hodnett, 1998	Brazil	196	WH -> VG		+	+	+		
13	Rawls et al., 1982*	USA, nationwide	5320	WH -> VG	+	+	+	+	+	
14	Gupta and Larson, 1979	Central USA	43 sediment and soil samples	WH -> VG	+	+	+	+	+	
15	Rajkai and Varallyay, 1992	Hungary	270	WH -> VG	+		+	+	+	
16	Rawls et al., 1983*	USA, nationwide	5320	WH -> VG	+	+	+	+	+	
17	Peterson et al., 1968	Pennsylvania, USA	1267	WH			+			
18	Bruand et al., 1994	Central France	20 Bt horizons	WH			+			
19	Canarache, 1993	Romania	Unknown	WH			+		+	
20	Hall et al., 1977	UK, England, Wales	261	WH	+	+	+		+	

A.M. Abdelbaki, 2021

Table 4

SSCBDOM-K_{sat} pedotransfer functions Group (PTFs that require inputs of particle size distribution bulk density and organic matter content).

PTF ID	Formula (cm/h) [†]	Development Dataset		References
		Size	Source	
F4.1	$K_{sat} = 0.04167 \cdot \text{Exp}[20.62 - 0.96 \ln CL - 0.66 \ln SA - 0.46 \ln OM - 8.43 BD]$	182	Belgium	[24]
F4.2	$K_{sat} = 0.04167 \cdot \text{Exp}[9.5 - 1.471 BD^2 - 0.688 OM + 0.0369 OM^2 - 0.332 \ln(CL + SI)]$	88	Netherlands	[42]
F4.3	$K_{sat} = 0.04167 \cdot \text{Exp}[-43.1 + 64.8 BD - 22.21 BD^2 + 7.02 OM - 0.1562 OM^2 + 0.985 \ln(OM) - 0.01332 CL \cdot OM - 4.71 BD \cdot OM]$	88	Netherlands	[42]
F4.4	$K_{sat} = 0.04167 \cdot \text{Exp}[7.755 + 0.0352 SI + 0.93 - 0.976 BD - 0.00048 CL^2 - 0.000322 SI^2 + 0.001 SI^{-1} - 0.0748 OM^{-1} - 0.643 \ln SI - 0.0139 (BD \cdot CL) - 0.167 (BD \cdot OM) + 0.298 CL - 0.03305 SI]$	1136	Europe	[5]
F4.5	$K_{sat} = 0.04167 \cdot \text{Exp}(45.8 - 14.34 BD + 0.001481 SI^2 - 27.5 BD^{-1} - 0.891 \ln(SI) - 0.34 \ln(OM))$	832	Netherlands	[19]
F4.6	$K_{sat} = 0.04167 \cdot \text{Exp}(-42.6 + 8.71 OM + 61.98 BD - 20.79 BD^2 - 0.2107 OM^2 - 0.0162 CL \cdot OM - 5.382 BD \cdot OM)$	832	Netherlands	[19]
F4.7	$K_{sat} = 0.1 \cdot (-4.994 + 0.56728 SA - 0.131 CL - 0.0127 OM)$	2178	Spain	[39]
F4.8	$K_{sat} = 0.04167 \cdot (10^{(0.571 + 0.956 Z^4)})$ where $Z = f(SA, CL, BD, OM)$	886	USA	[10]
F4.9	$K_{sat} = (\theta_s - \theta_{33})^{(3-\lambda)}$ where θ_s , θ_{33} , and $\lambda = f(SA, CL, OM)$	2178	Spain	[18]
F4.10	$K_{sat} = 0.04167 \cdot \text{Exp}(13.262 - 1.914 \ln SA - 0.974 \ln SI - 0.058 CL - 1.709 \ln OM + 2.885 OM - 8.026 \ln BD)$	36	China	[43]
F4.11	$K_{sat} = \text{Exp}(1.9582 + 0.0308 SA - 0.6142 BD - 0.1566 OM)/24$	182	Belgium	[44]
F4.12	$K_{sat} = 80.16 + 0.81 SA - 143.57 BD + 21.99 OM + 0.002 SA^2 - 0.687 SA \cdot BD - 0.0022 SA \cdot OM + 63.33 BD^2 - 13.63 BD \cdot OM - 0.219 OM^2$	101	India	[45]
F4.13	$K_{sat} = -1.272 - 0.0433 SI + 0.693 OM + 13.04 P + 0.0009 SI^2 - 0.0074 SI \cdot OM - 0.091 SI \cdot P - 0.0036 OM^2 - 1.128 OM \cdot P - 3.204 P^2$	101	India	[45]
F4.14	$K_{sat} = 271.11 - 9.116 SI + 45.38 OM - 289.13 BD + 0.0809 SI^2 - 0.695 SI \cdot OM + 4.681 SI \cdot BD + 1.991 OM^2 - 25.74 OM \cdot BD + 80.04 BD^2$	101	India	[45]
F4.15	$K_{sat} = (-3581.42 + 36.78 SA + 36.58 SI + 36.8 CL - 44.43 BD - 0.59 PD - 16.96 OM)/24$	29	India	[41]
F4.16	$K_{sat} = (-53607.3 + 536.19 SA + 536.01 SI + 536.05 CL + 62.86 BD - 67.47 PD - 19.55 OM + 2.46 P)/24$	29	India	[41]

† K_{sat}, saturated hydraulic conductivity (cm/hr); SA, sand content (%); SI, silt content (%); CL, clay content (%); OM, organic matter content (%); BD, bulk density (Mg m⁻³); P, total porosity (cm³/cm³); θ_s, saturated water content (cm³/cm³); θ₃₃, water content at -33 kPa (cm³/cm³); PD, particle density (was taken 2.65 Mg m⁻³ if missed).

Глобальная база данных с высоким пространственным разрешением гидравлических и тепловых параметров почвы для моделирования земной поверхности.

(The global high-resolution dataset of soil hydraulic and thermal parameters for land surface modeling, Dai Y. N. et al, 2019)

- 30`` пространственное разрешение,
- 8 слоёв по глубине (0 - 0.0451 m, 0.0451 - 0.0906 m, 0.0906 - 0.1655 m, 0.1655 - 0.2891 m, 0.2891 - 0.4929 m, 0.4929 - 0.8289 m, 0.8289 - 1.3828 m, 1.3828 - 3.8019 m).

почвенные характеристики:

- % объёмное содержание песка, глины, пыли, органики и пористости (песок+глина+пыль+органика+пористость = 1),
- характеристики для параметризации Брукса-Кори и ван Генухтена-Муалема.

Параметры для ОГХ (Θ) получены с помощью минимизации разницы между оптимальной ОГХ и всеми ОГХ, полученным по выбранным наиболее часто используемым и цитируемым ПТФ. Данный метод подгонки учитывает информацию от всех ПТФ и присваивает больший вес тем ПТФ, которые близки между собой. *Поскольку каждая ПТФ имеет свою применимость к конкретным почвенным условиям или региональным особенностям на основе откалиброванных образцов почвы, по которым она разрабатывалась, этот метод больше подходит для глобального применения.*

Гидравлическая проводимость вычислялась как ансамблевое среднее, полученное по выбранным наиболее часто используемым и цитируемым ПТФ.

Эксперимент по оценке и выбору ПТФ:

Из базы (Dai Y. N. et al, 2019) были выбраны типы почвы так, чтобы % распределение глины в них менялось равномерно от меньшего к большему:

- OC – organic carbon
OC = org/1.724
(органический углерод)
- BD – bulk density
(объёмная плотность)
- PD – particle density
(плотность твёрдых частиц)

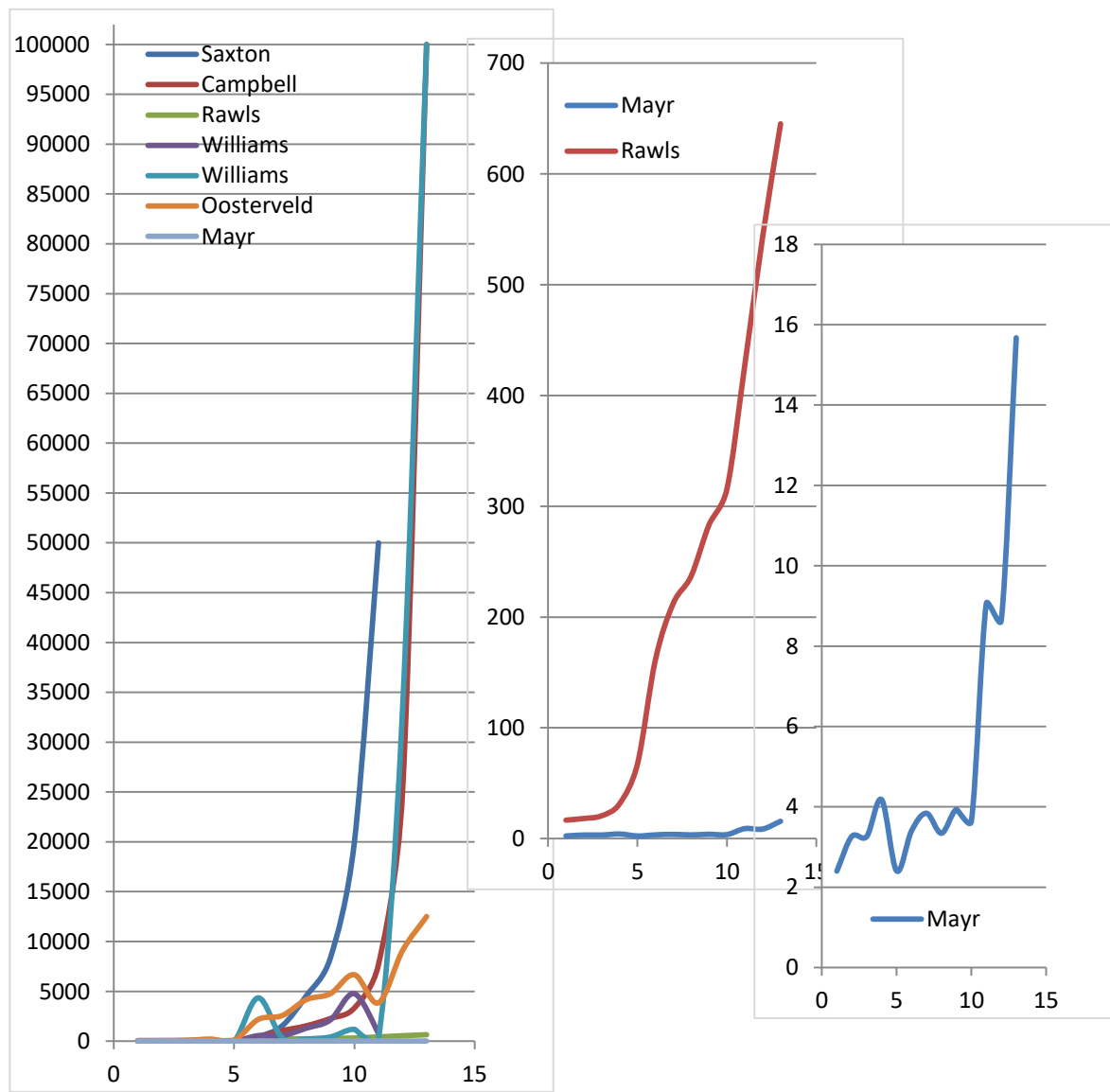
№	Sand, %	Silt, %	Clay, %	OC, %	BD, г/см ³	PD, г/см ³
1	88.619	8.386	2.995	0.452	1.913	2.6
2	81.948	13.301	4.75	0.007	1.882	2.6
3	80.547	13.853	5.6	0.004	1.917	2.6
4	65.852	24.317	9.83	0.008	1.886	2.6
5	10	45	45	2.769	1.241	2.6
6	25.579	39.585	34.835	0.011	1.748	2.6
7	20.522	29.695	49.783	0.294	1.656	2.6
8	25.682	19.033	55.285	0.573	1.691	2.6
9	22.37	19.407	58.222	0.377	1.681	2.6
10	24.647	13.547	61.807	0.192	1.704	2.6
11	8	17	75	0.324	1.538	2.6
12	9.46	16.73	73.809	0.114	1.643	2.6
13	1	17	82	0.268	1.635	2.6

Анализ ПТФ (для Брукса-Кори)

Для расчёта потенциала влаги и коэффициента λ по ПТФ использовалось ПО «CalcPTF» (Guber A., Pachevsky Y, 2010), где представлены следующие ПТФ:

- Saxton et al., 1986;
- Campbell and Shiosawa, 1992;
- Rawls and Brakensiek, 1985;
- Williams et al., 1992;
- Williams et al., 1992;
- Oosterveld and Chang, 1980;
- Mayr and Jarvice, 1999.

Из этого эксперимента было установлено, что большинство известных ПТФ не адекватно оценивают потенциал влаги, сильно его завышая для большого % содержания глины. Таким образом, для теста модели была выбрана ПТФ Майера. Для коэффициента ν аналогично.



Анализ ПТФ (для Брукса-Кори)

Для расчёта гидравлического потока использовались следующие ПТФ:

- Rawls and Brakensiek, 1985;
- Cosby, 1984;
- Campbell, 1985;
- Saxton and Rawls, 1986;
- Wosten (2 шт.), 1997;
- Jabro, 1992;
- Ottoni (3 шт.), 2019;
- Shwetha_Prasanna (2 шт.), 2018
- Patil, 2009;
- Tomassela, 1997.

1 график снизу:

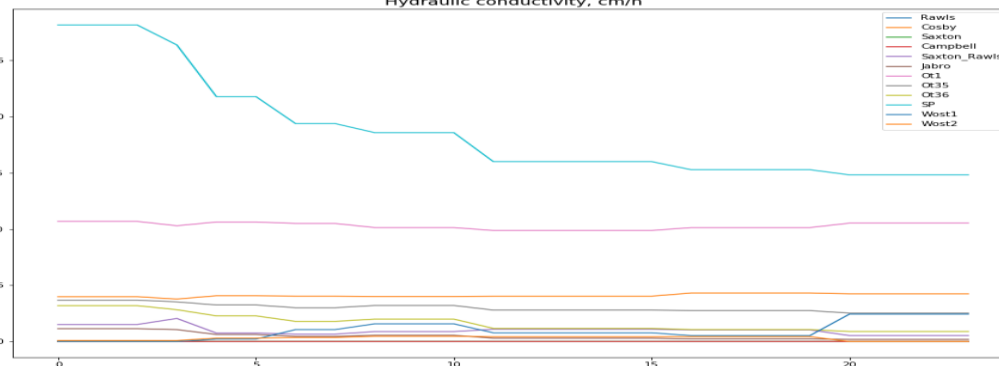
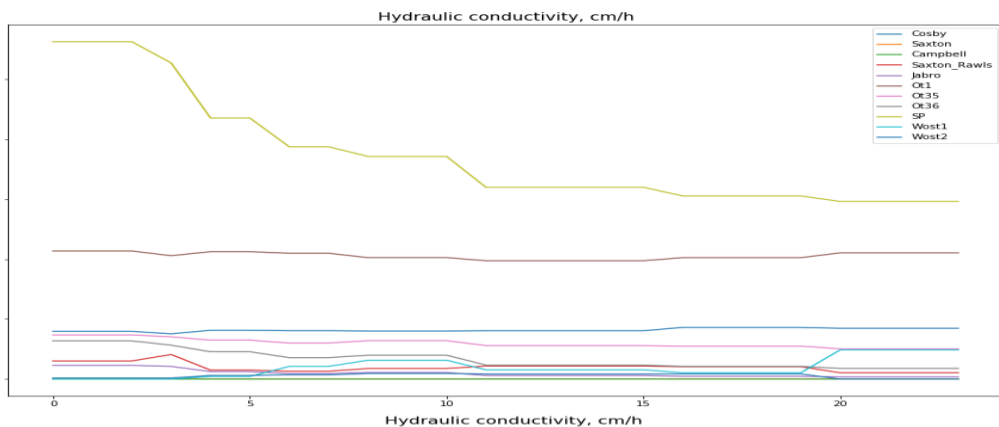
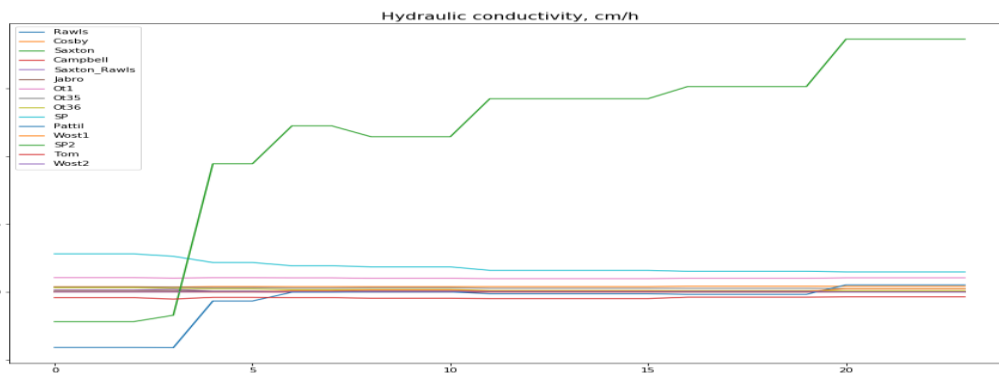
изображены все функции,

Видно что некоторые дают даже отрицательные значения.

2 график: убраны ПТФ с отрицательными значениями

3 график: убраны ПТФ с слишком высокими значениями.

Таким образом для теста модели была выбрана ПТФ Shwetha_Prasanna (первая).



Эксперименты по запуску модели (для одной точки).

Координаты: Бакчар, 57 с.ш., 82 в.д.

Атмосферный форсинг (температура воздуха, атмосферное давление, интенсивность осадков, скорость ветра, относительная влажность воздуха, приходящая солнечная радиация, приходящая длинноволновая радиация):

- август 2012 г. - сентябрь 2019 г. , шаг по времени – 1 час,
- данные измерения,
- данные реанализа Era5.

Начальные условия:

- профиль температуры почвы по данным измерения на 01.08.2012 00:00.
- профиль влажности почвы: максимальное насыщение почвы влагой, % (пористость * ρ воды / ρ сухого остатка).

Уровень глубин: 0, 1., 2., 4., 8., 15., 25., 35., 55., 75., 95., 115., 135., 155., 200., 250., 300., 350., 400., 500., 600., 700., 800., 1000 см.

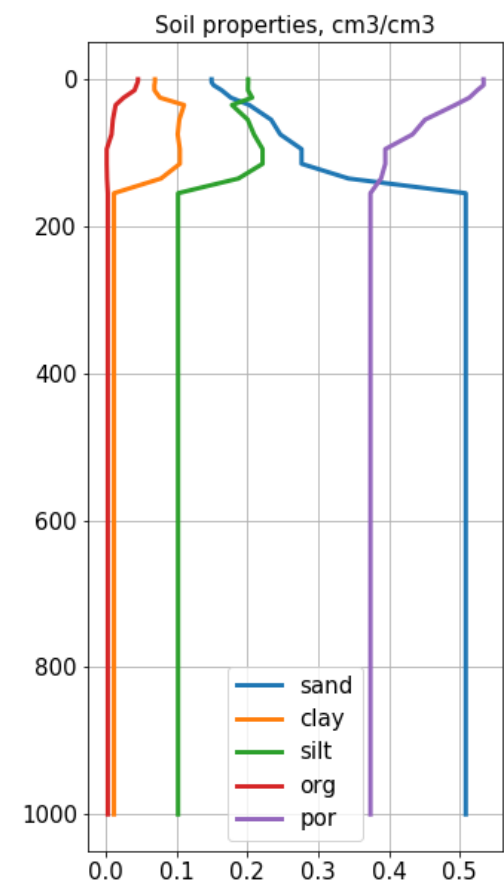
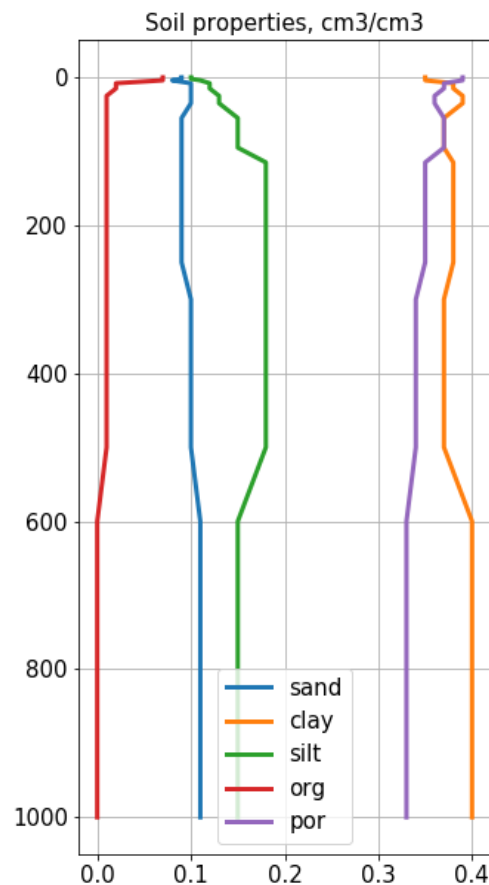
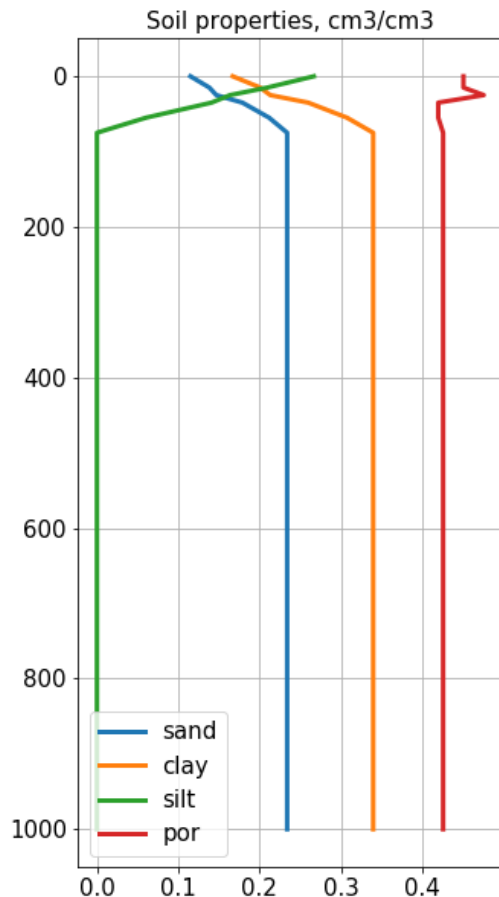
Эксперименты по запуску модели.

Исходные данные по гранулометрическому составу почвы:

данные из исходной базы
модели (57° с.ш., 82° в.д.)

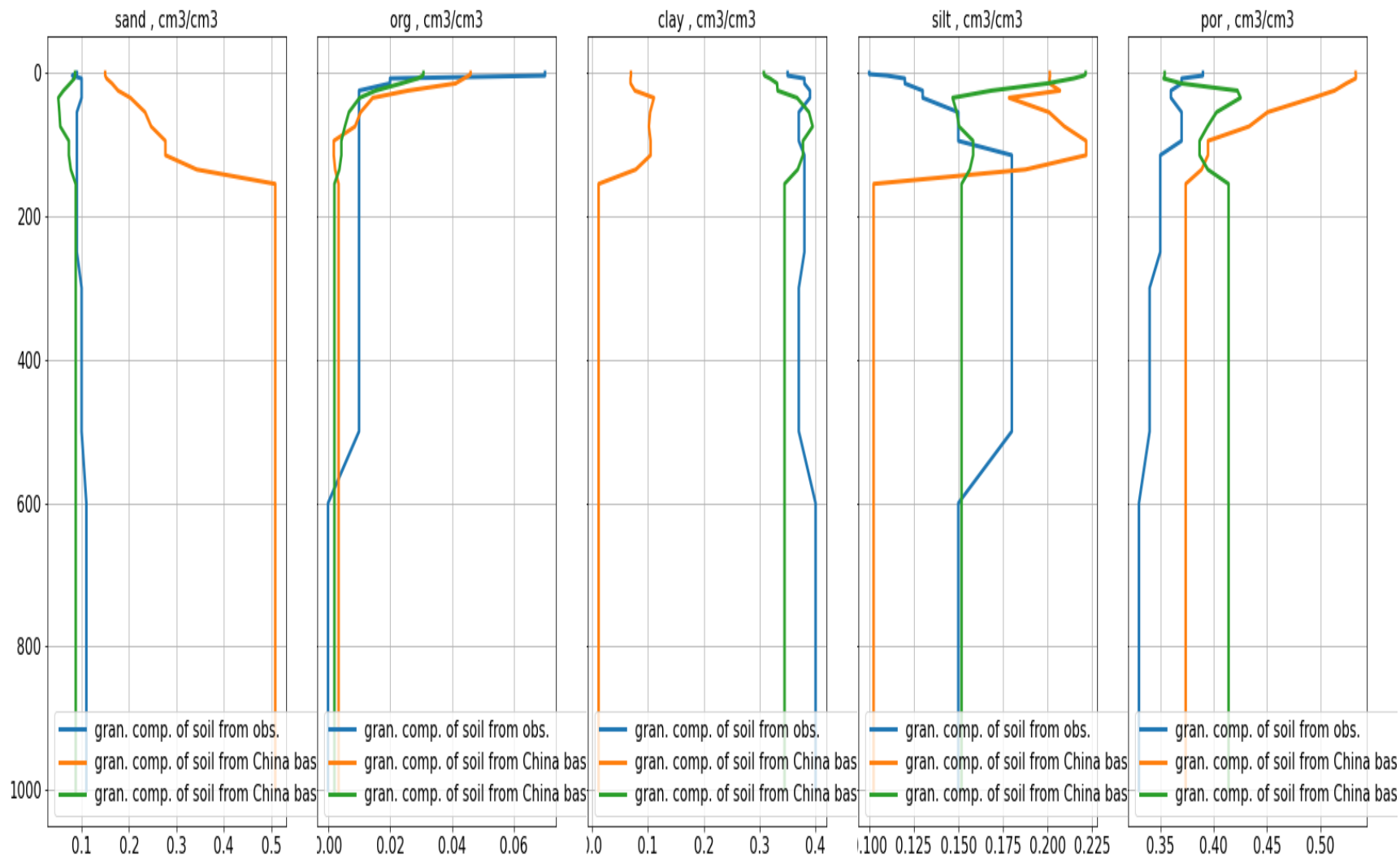
данные измерения Е.А.
Дюкарева: Бакчар

данные из ChinaDB: (57°
с.ш., 82° в.д.)



Эксперименты по запуску модели.

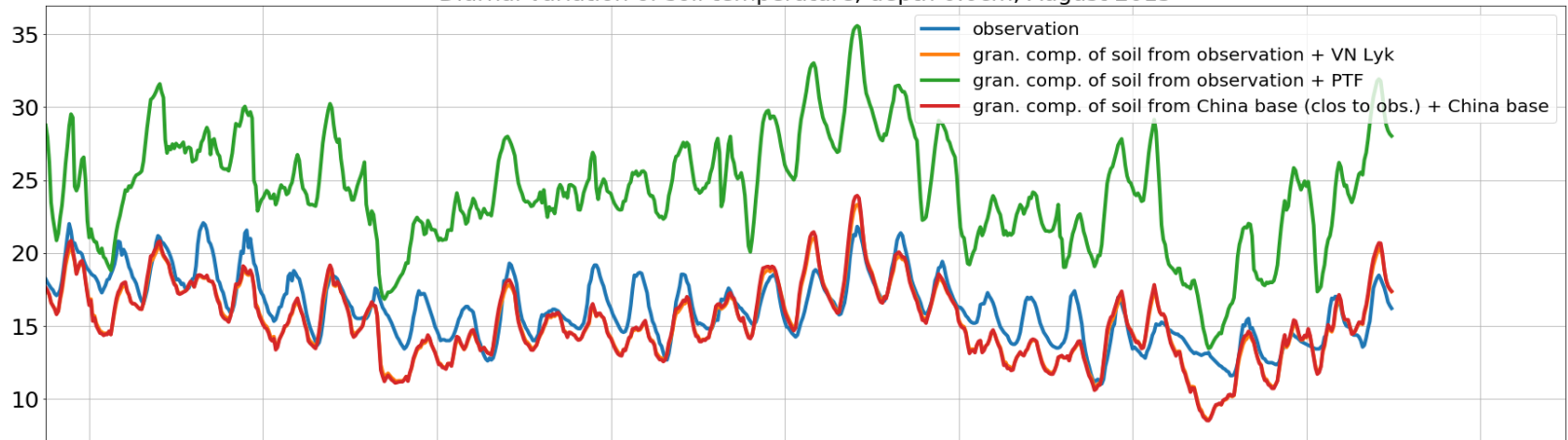
Исходные данные по гранулометрическому составу почвы: данные измерения Е.А. Дюкарева, данные из SpinaDB (57° с.ш., 82° в.д.), данные из SpinaDB (точка близкая по составу к данным измерения)



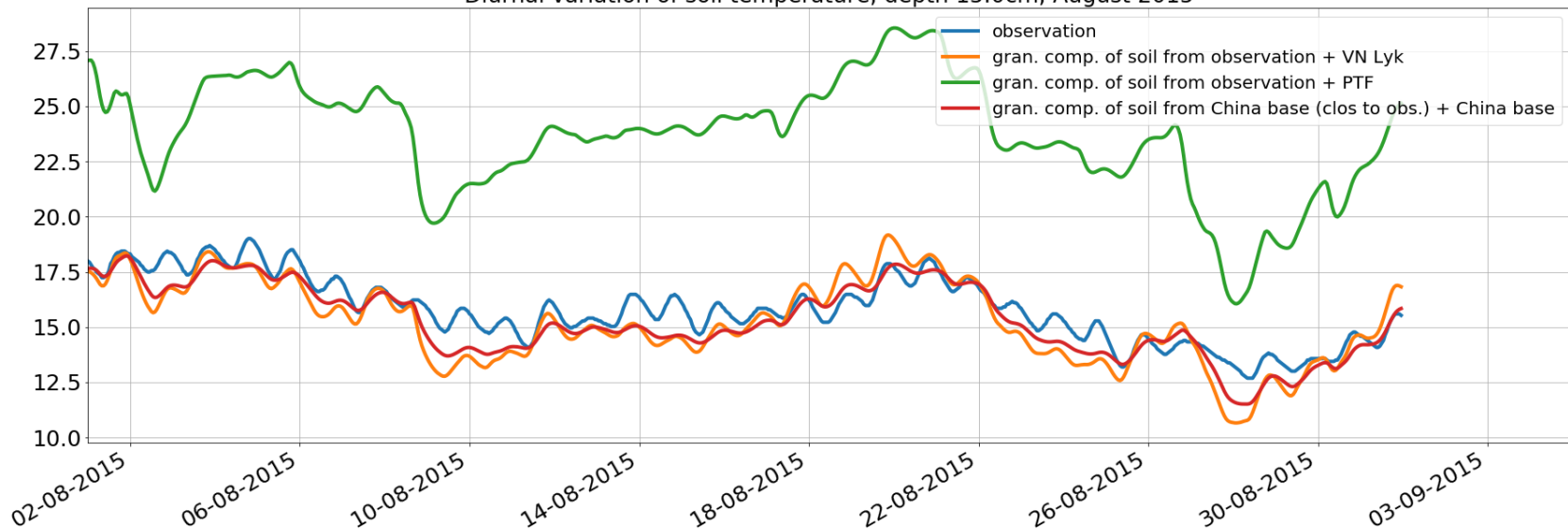
Эксперимент 1.

- Гран. состав из данных измерений + гидродин. хар-ки из исходной базы модели
- Гран. состав из данных измерений + гидродин. хар-ки из ПТФ
- Гран. состав из китайской базы (похожая точка) + гидродин. хар-ки из китайской базы

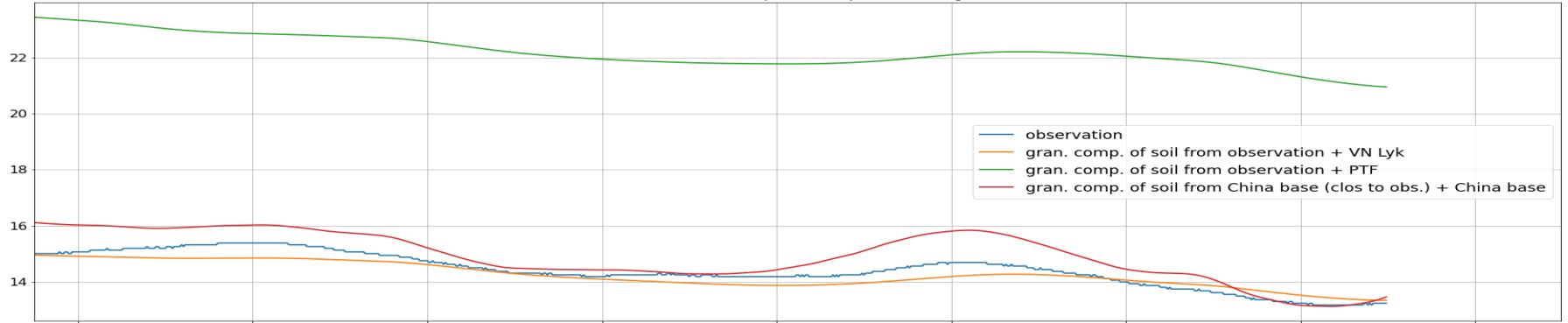
Diurnal variation of soil temperature, depth 0.0cm, August 2015



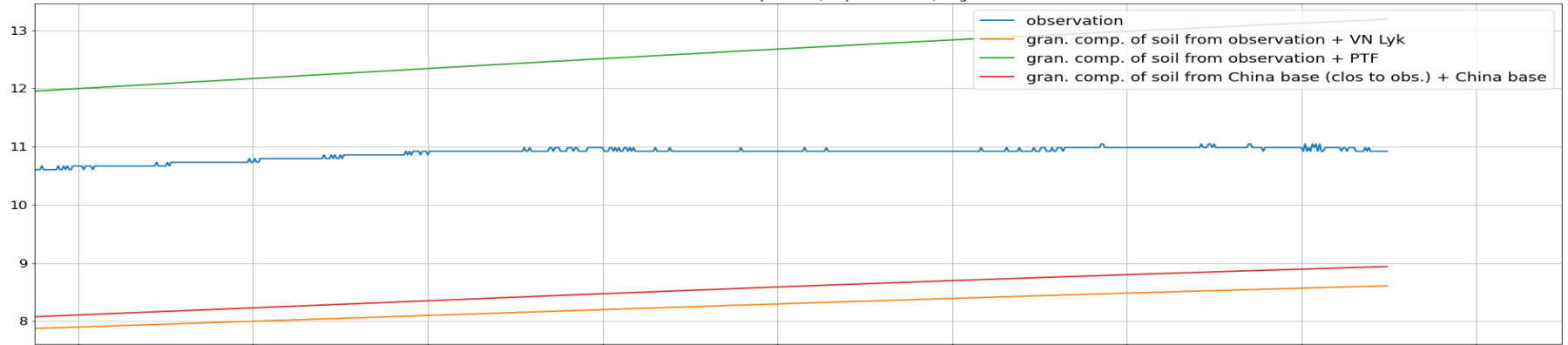
Diurnal variation of soil temperature, depth 15.0cm, August 2015



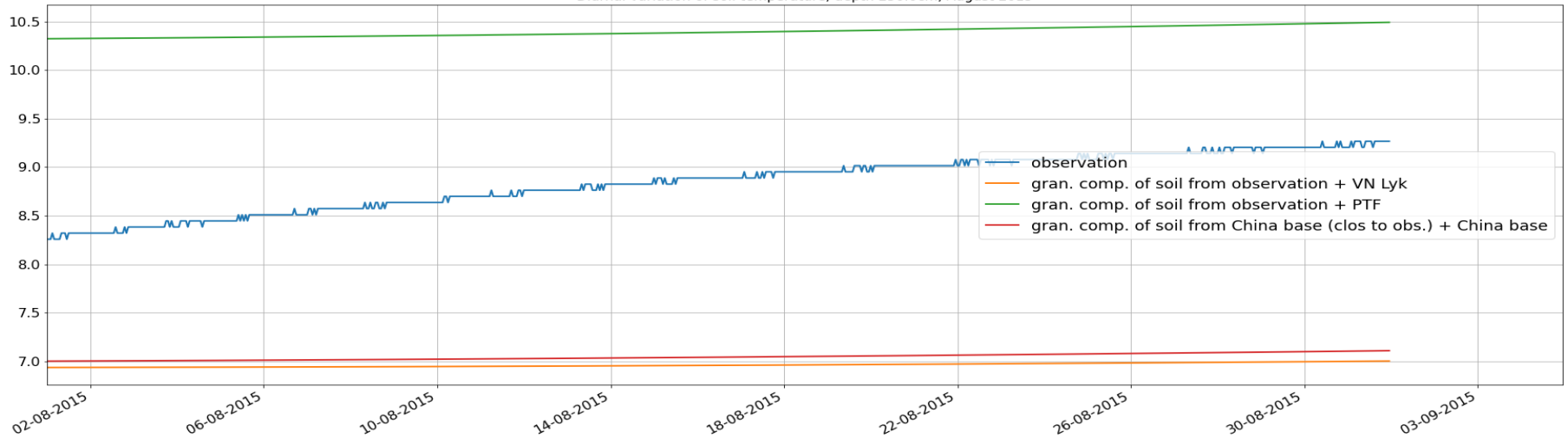
Diurnal variation of soil temperature, depth 55.0cm, August 2015



Diurnal variation of soil temperature, depth 155.0cm, August 2015



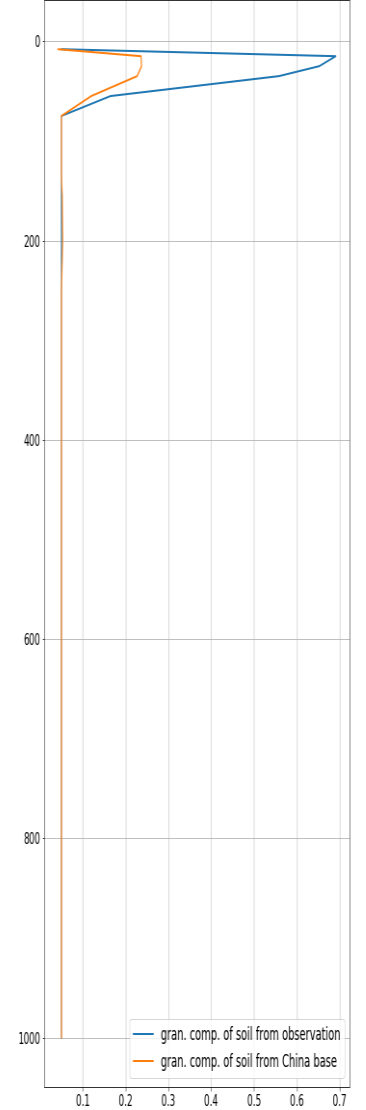
Diurnal variation of soil temperature, depth 250.0cm, August 2015



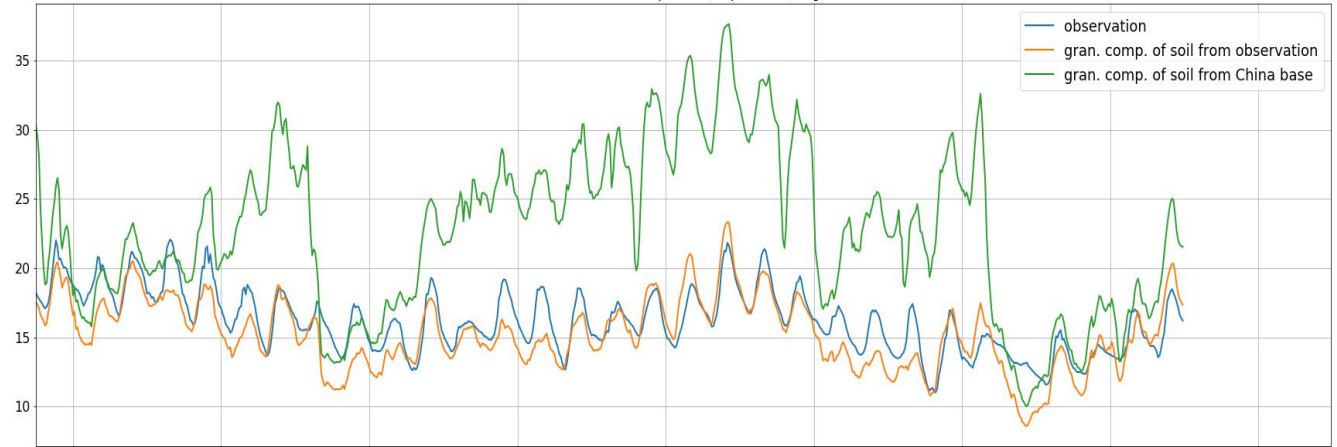
Эксперимент 2.

- Гран. состав из данных измерений + гидродин. хар-ки из исходной базы модели
- Гран. состав из китайской базы (точка Бакчар) + гидродин. хар-ки исходной базы модели

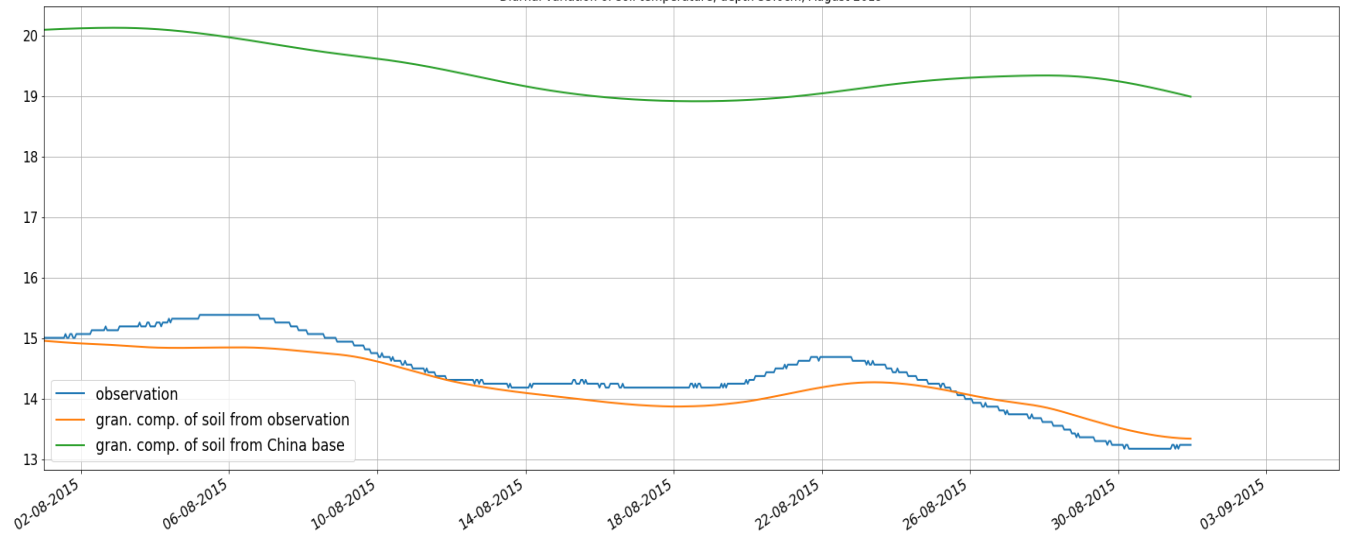
Mean volumetric liquid water saturation degree profile from 8.0cm, August 2014



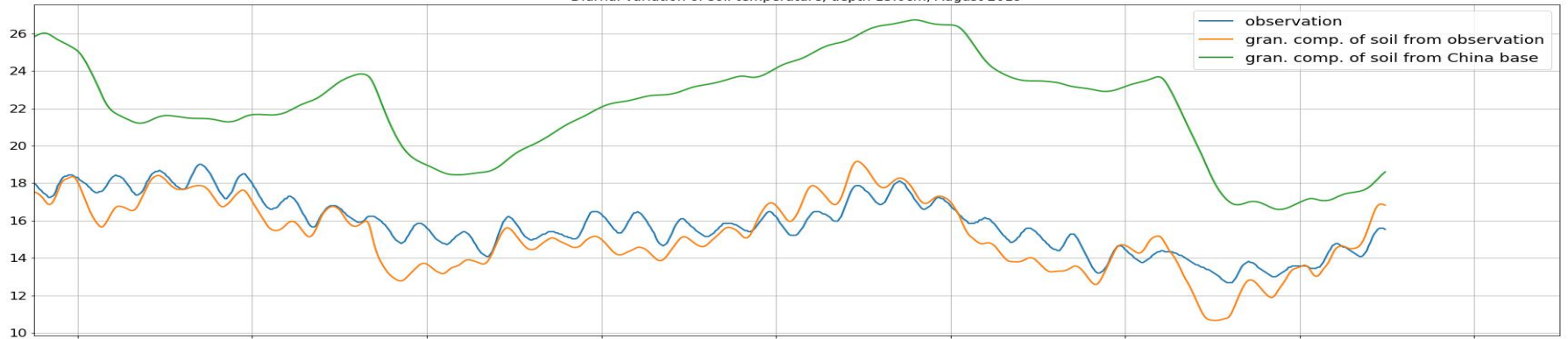
Diurnal variation of soil temperature, depth 0.0cm, August 2019



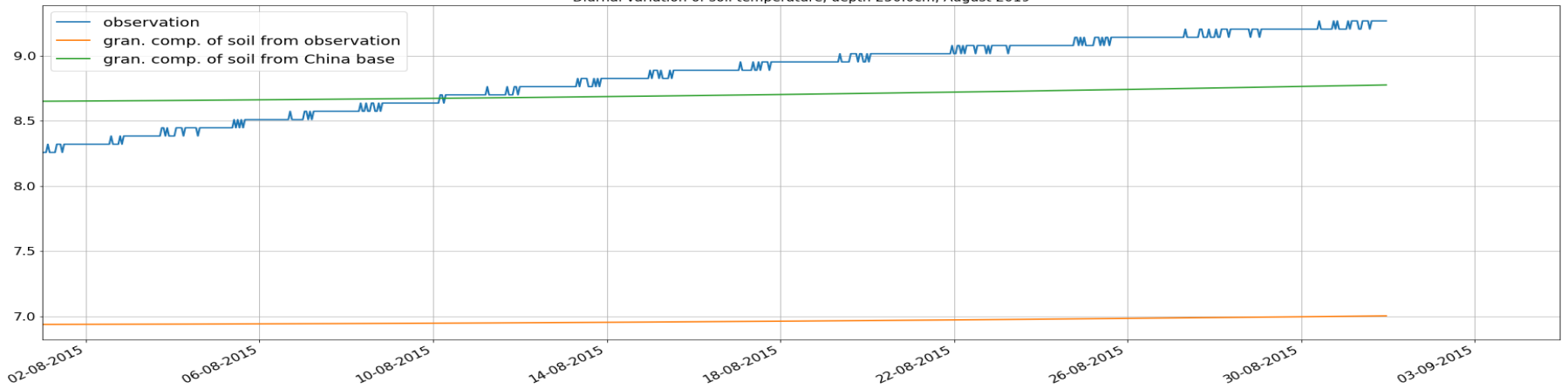
Diurnal variation of soil temperature, depth 55.0cm, August 2019



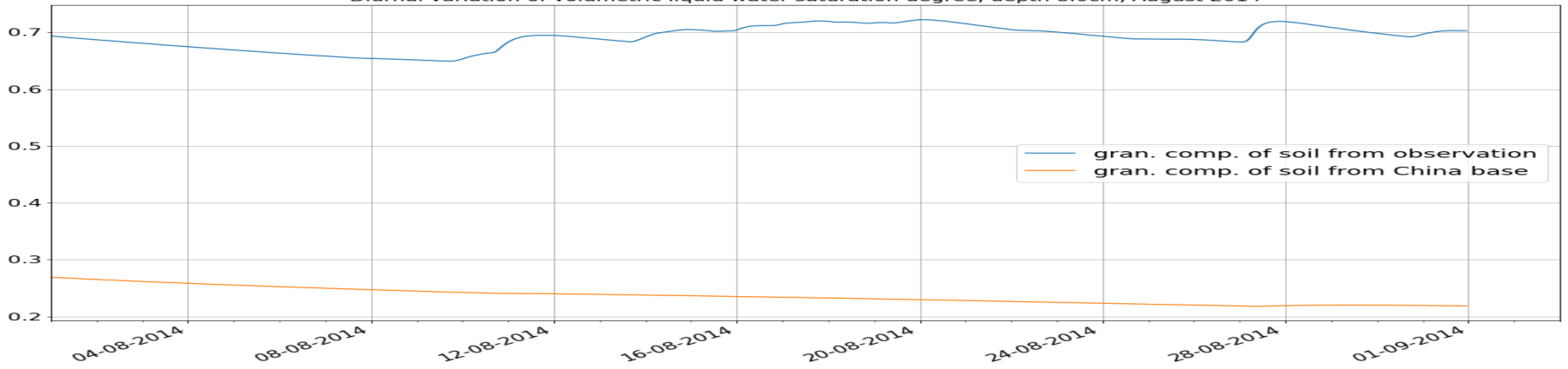
Diurnal variation of soil temperature, depth 15.0cm, August 2019



Diurnal variation of soil temperature, depth 250.0cm, August 2019

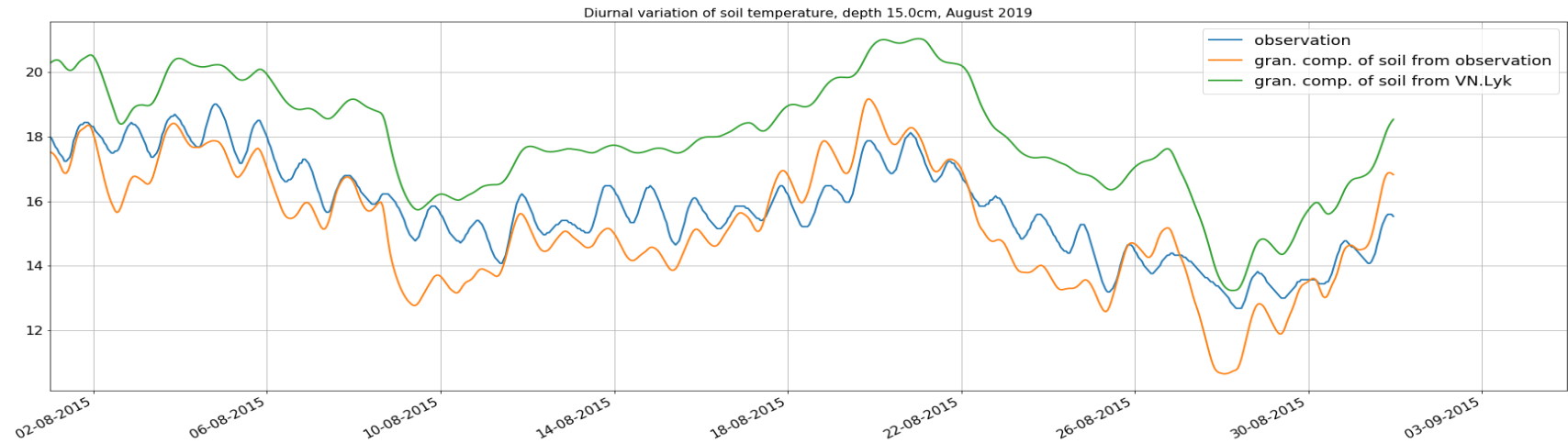
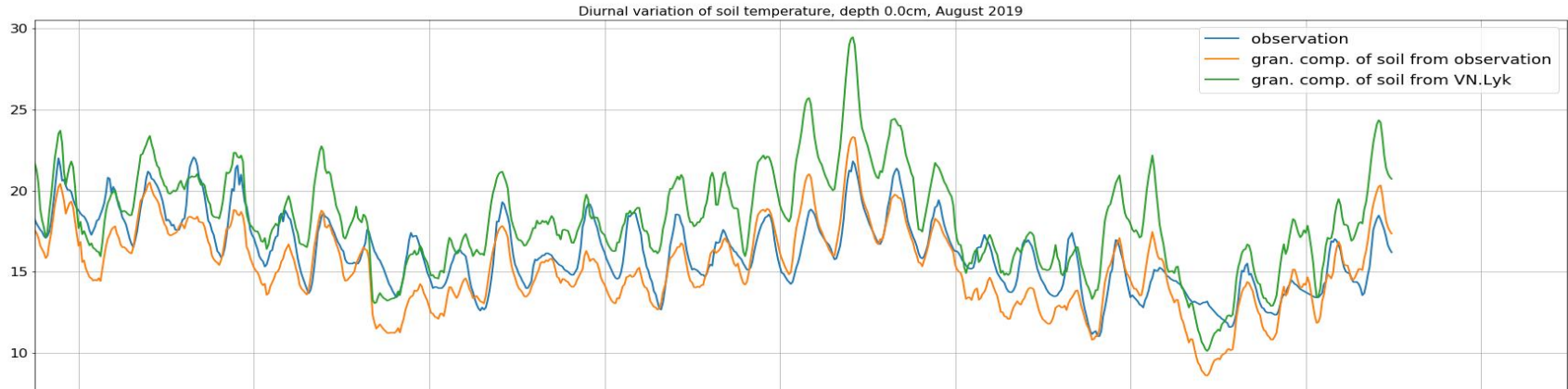


Diurnal variation of volumetric liquid water saturation degree, depth 8.0cm, August 2014

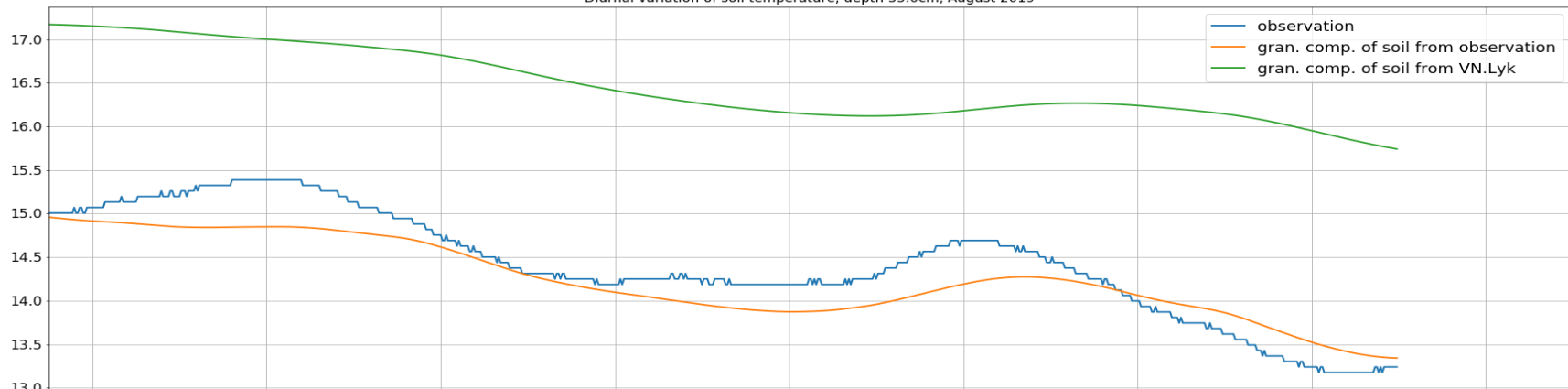


Эксперимент 3.

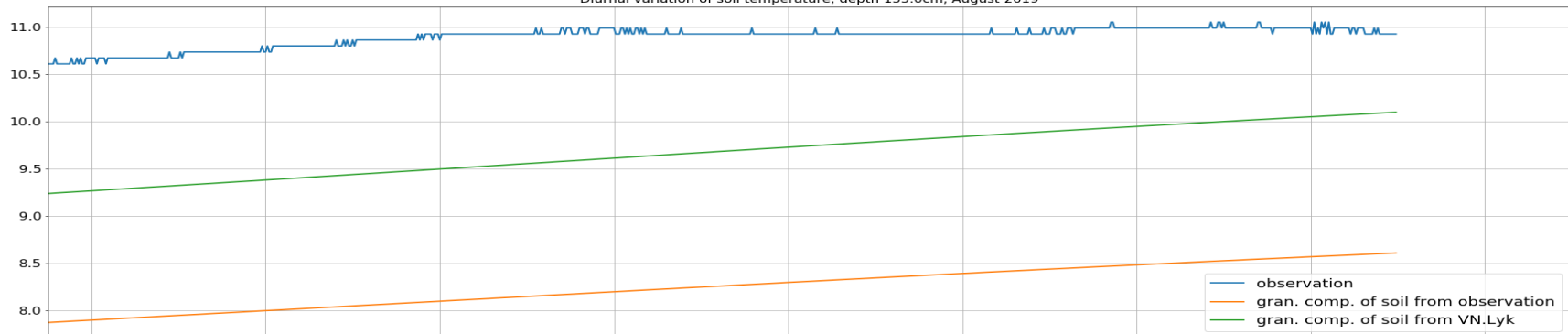
- Гран. состав из данных измерений + гидродин. хар-ки из исходной базы модели
- Гран. состав исходной базы модели + гидродин. хар-ки из исходной базы модели



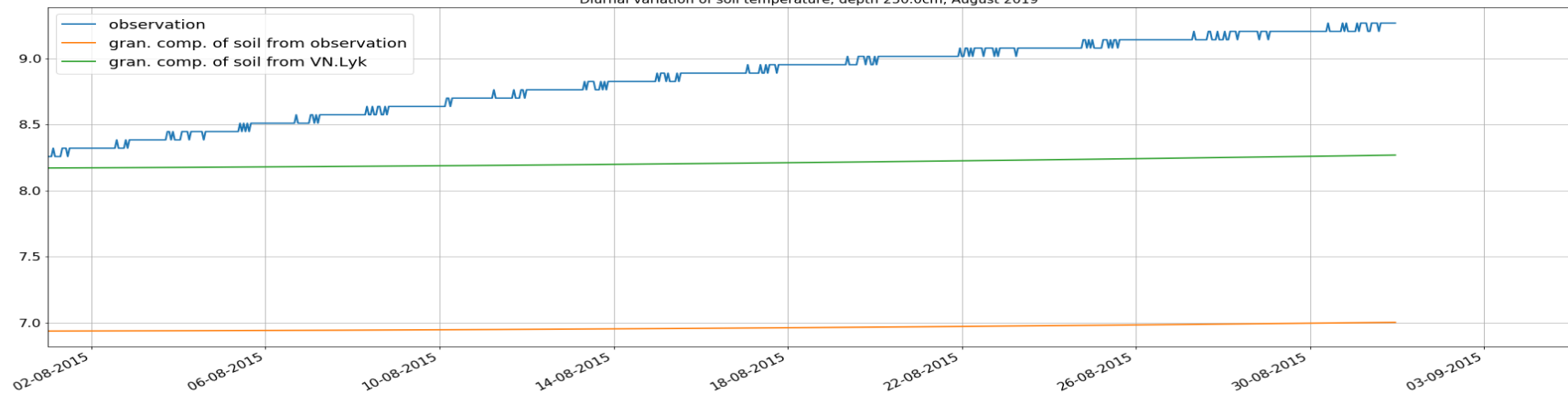
Diurnal variation of soil temperature, depth 55.0cm, August 2019



Diurnal variation of soil temperature, depth 155.0cm, August 2019



Diurnal variation of soil temperature, depth 250.0cm, August 2019



Дополнительно:

ПТФ Майр и Джарвис (1999) на основе скандинавского набора данных:

$$\log(a) = -4.9840297533 + 0.0509226283 \cdot \text{sand} + 0.1575152771 \cdot \text{silt} + 0.1240901644 \cdot \rho_b - 0.1640033143 \cdot \text{OC} - 0.0021767278 \cdot \text{silt}^2 + 0.0000143822 \cdot \text{silt}^3 + 0.0008040715 \cdot \text{clay}^2 + 0.0044067117 \cdot \text{OC}^2$$

$$\theta_s = .2345971971 + 0.0046614221 \cdot \text{sand} + 0.0088163314 \cdot \text{silt} + 0.0064338641 \cdot \text{clay} + 0.3028160229 \cdot \rho_b + 1.79762 \cdot 10^2 \cdot \text{sand}^2 - 3.134631 \cdot 10^2 \cdot \text{silt}^2$$

$$\log(1/b) = -0.8466880654 - 0.0046806123 \cdot \text{sand} + 0.0092463819 \cdot \text{silt} - 0.4542769707 \cdot \rho_b - 0.0497915563 \cdot \text{OC} + 0.0003294687 \cdot \text{sand}^2 + 0.000001689056 \cdot \text{sand}^3 + 0.0011225373 \cdot \text{OC}^2$$

ПТФ Швета и Прасана (2018):

$$K_{\text{sat}} = 80.16 + 0.81 \text{sand} - 143.57 \rho_b + 21.99 \text{OM} + 0.002 \text{sand}^2 - 0.687 \text{sand} \cdot \text{BD} - 0.0022 \text{sand} \cdot \text{OM} + 63.33 \rho_b^2 - 13.63 \rho_b \cdot \text{OM} - 0.219 \text{OM}^2$$