

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

УДК – 631.4  
ГРНТИ – 14.35.07, 05.05.33, 20.15.05,  
ББК – 4

**РЕКЛАМНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ**

**Программный комплекс «Автоматический расчет запасов органического углерода в слое почвы произвольной мощности и визуализации органопроефилей в информационной системе Почвенно-географическая база данных Российской Федерации»**

2024.04832915.01616-01 99 01

Листов 10

Разработчики:

\_\_\_\_\_ /Чернова О.В./

\_\_\_\_\_ / Авраамова О.Д./

\_\_\_\_\_ / Голозубов О.М./

07.01.2024

Программный комплекс автоматического расчета запасов органического углерода в слое почвы произвольной мощности и визуализации органофильей в Информационной системе Почвенно-географическая база данных Российской Федерации (ПК) функционирует в составе Информационной системы Почвенно-географическая база данных Российской Федерации (ИС ПГБД РФ) (а. с. №19661 от 06.11.2013) (<https://soil-db.ru>), предназначен для автоматического расчёта запасов органического углерода в слое почвы заданной мощности до глубины 100 см, а также визуализации распределения содержания и запасов органического углерода в почвах на картографической основе.

Программный комплекс работает на основе профильной атрибутивной базы данных и векторной версии Почвенной карты РСФСР М: 1:2 500 000 (ПК РФ), (1988), дополненной Почвенной картой Крыма того же масштаба (Урусевская и др., 2019), аккумулированных в ИС ПГБД РФ (<https://soil-db.ru/attr>). Предложен набор унифицированных алгоритмов и пересчётных коэффициентов, позволяющих рассчитывать запасы углерода в заданном слое реальной почвы для всего разнообразия почв РФ на основе аккумулированных в ИС ПГБД РФ данных, в том числе неполных или разреженных, взаимно дополняющих друг друга. Отображение результатов расчётов на картографической основе позволяет оценить общие запасы органического углерода и структуру углеродных пулов в почвенном покрове страны и конкретных регионов.

База данных работает под управлением СУБД MS SQL Server 2016.

В процессе работы программы никакие данные, входящие в состав исходной базы, не изменяются. Все вычисления выполняются с помощью служебных (временных) таблиц, хранимых процедур (stored procedure), функций и представлений (View).

### **Алгоритм расчетов**

Исходными данными для расчёта запасов углерода в толще почвы произвольной мощности являются следующие показатели для каждого

горизонта в пределах рассматриваемой толщи: содержание органического углерода; плотность (объемная масса) горизонта в естественном сложении; степень каменистости, %; мощность горизонта, см.

(1)

$$C_s = \sum_{i=0}^n C_i B D_i H_i K_i$$

$C_s$  – запасы органического углерода в слое почвы произвольной мощности, (т/га).

$N$  – число горизонтов в слое почвы;

$C_i$  – содержание органического углерода в горизонте (CORG), %;

$B D_i$  – плотность горизонта, г/см<sup>3</sup>;

$H_i$  – мощность горизонта, см

$K_i$  – каменистость горизонта, %

Основные числовые показатели, входящие в уравнение, извлекаются из профильной атрибутивной базы данных (БД). В настоящее время она состоит из трех интегрированных в нее таблиц: Единого государственного реестра почвенных ресурсов России (2014) - soil\_data\_863n; таблицы «Почвы – объекты региональных Красных книг почв» (2022) - soil\_data\_OOPT\_882; таблицы «Органический углерод почв лесных экосистем европейской территории России» (Подвезенная и др., Роспатент № 2020620065, 2020) - soil\_data\_Kirillova\_237.

На первом шаге на основании таблиц soil\_data\_863n, soil\_data\_OOPT\_882 и soil\_data\_Kirillova\_237 составляется объединенная таблица soil\_data\_united с исходными данными. В этом процессе все числовые данные приводятся к типам float или integer, к значениям в столбце идентификатора во второй таблице добавляется 10000, в третьей - 20000. Это позволяет избежать пересечения диапазонов идентификаторов.

Далее в новой таблице создаются столбцы для хранения промежуточных результаты вычислений.

Таблица 1

Дополнительные столбцы для хранения результатов расчетов

Название	Тип данных	Описание
Calc_ORGMAT	float	ORGMAT, рассчитанный на основании имеющегося значения CORG

Calc_CORG	float	CORG, рассчитанный на основании имеющегося значения ORGMAT
Calc_BD	float	столбец, содержащий расчетные значения плотности, рассчитанные на основании отнесения образца к той или иной группе и по формуле (2) с соответствующими коэффициентами.
Calc_BD1	float	столбец, содержащий расчетные значения плотности с их заменой на экспериментальные при наличии последних
Soil_Type_Group_Id	int	ссылка на номер группы почв
Calc_Top1	float	верхняя граница образца или горизонта по базе
Calc_Top2	float	скорректированная верхняя граница образца или горизонта с учетом зазора между слоями
Calc_Bot1	float	нижняя граница образца или горизонта по базе
Calc_Bot2	float	скорректированная нижняя граница образца или горизонта с учетом зазора между слоями
Calc_HORPWR	float	мощность горизонта на основании скорректированных данных

### *Расчет недостающих показателей содержания органического углерода*

В случае отсутствия аналитических данных по содержанию органического вещества (ORGMAT), и органического углерода (CORG), делается попытка установить содержание углерода на основании показателей зольности (ASH) или потери при прокаливании (LOSIG).

Для минеральных горизонтов с содержанием органического углерода <15% (C < 8,7%) при определении содержания углерода по данным о содержании органического вещества (гумуса) используется коэффициент пересчета 0.58, при обратном пересчете использовали коэффициент 1,724. Содержание органического углерода, определенное методом сухого сжигания по количеству выделившегося CO<sub>2</sub>, всегда выше, чем таковое, полученное с использованием метода Тюрина в различных модификациях, наиболее часто употребляемого в нашей стране. Для получения абсолютных величин запасов органического углерода в минеральных горизонтах вводится пересчетный коэффициент = 1,15. Содержание органического вещества в органогенных горизонтах обычно характеризуют данными о потере при прокаливании (ППП), которые приравниваются к содержанию органического вещества. Для органогенных горизонтов коэффициенты пересчета органического вещества на углерод могут колебаться от 0,53 до 0,41 (Soil

organic carbon..., 2018). В своей работе мы использовали коэффициент пересчета = 0,5.

Далее производятся расчеты с использованием указанных коэффициентов и заполняются столбцы ORGMAT и CORG. Таким образом, мы получаем максимально плотное заполнение ячеек на основании имеющихся в базе данных.

*Расчет недостающих данных об объемной плотности почвенных горизонтов*

Одной из причин невысокой точности оценок запасов почвенного углерода является недостаток данных о плотности (объемной массе) горизонтов. Для решения проблемы широко используются педотрансферные функции (ПТФ), позволяющие вычислить значение плотности по другим доступным почвенным характеристикам. Для расчета плотности минеральных горизонтов наилучшие результаты получены при использовании предложенной О.В. Честных и Д.Г. Замолотчиковым (2004) пятипараметрической нелинейной функции, которая позволяет прогнозировать плотность горизонтов в зависимости от содержания гумуса и глубины горизонта. Для органогенных горизонтов (с содержанием органического вещества более 15%) использование ПТФ дает неудовлетворительные результаты. На основе анализа имеющихся аналитических данных и экспертных оценок сформированы группы генетически сходных почв и почвенных горизонтов для оценки их объемной плотности (табл. 2).

Таблица 2

Генетически сходные почвы/группы почв и горизонтов и параметры/группы параметров уравнения для расчетов объемной плотности горизонтов

Группы параметры/ экспертные значения	Генетически сходные почвы/горизонты
Минеральные горизонты (ORGMAT ≤15%)	
Тундровые	Арктические, тундровые
Таёжные	Таёжные глеевые, торфянисто-перегнойные
	Подзолистые, включая глееватые, глее-подзолистые и остаточно-карбонатные

	Дерново-подзолистые, включая глееватые и глеевые
	Подзолы, включая глеевые и торфянистые
	Подбуры
	Буро-таежные, дерново-таежные, включая глеевые
	Палевые, дерново-карбонатные, перегнойно-карбонатные, грануземы, включая глеевые
	Бурые лесные
	Серые лесные, включая глеевые; остаточно-карбонатные, осолоделые, буровато-серые
Черноземы	Черноземы, лугово-черноземные
	Пойменные
Сухостепные	Каштановые, лугово-каштановые, бурые, включая солонцеватые
Луговые	Луговые, включая лугово-болотные, солонцеватые, осолоделые, слитые
	Солонцы, солоды, солончаки
-	Вулканические
Органогенные горизонты (ORGMAT >15%)	
Торфяные	Торфяные болотные, включая иловато-болотные
BD=0,1	$80\% \leq \text{ORGMAT}$
BD=0,2	$35\% < \text{ORGMAT} \leq 80\%$
BD=0,9	$15\% < \text{ORGMAT} \leq 35\%$

Плотность минеральных горизонтов почв с содержанием органического углерода (ORGMAT) менее 15% ( $C_i \leq 8,7\%$ ) в случае отсутствия аналитических определений рассчитывали с использованием функции:

$$BD = a_1 - a_2 / (MID + a_3) + a_4 / (HUM + a_5), \quad (2)$$

где: BD – объемная плотность, г/см<sup>3</sup>

MID – глубина середины горизонта, см

HUM – содержание органического вещества/гумуса (ORGMAT), %

$a_1 - a_5$  – параметры, определяемые типом почв

Было подобрано 6 групп параметров уравнения условно названных «Таежными», «Тундровыми», «Торфяными», «Луговыми», «Степными» и «Сухостепными» (табл. 2, 3), наиболее удовлетворительных для 15 групп генетически сходных почв, охватывающих большую часть разнообразия почв страны на уровне выделов легенды ПК РФ (табл. 3). Для вулканических почв приемлемых параметров уравнения подобрать не удалось, поэтому для оценки запасов углерода в этой группе почв использовали экспертные значения, полученные на основе анализа результатов единичных обследований.

Таблица 3.

## Параметры уравнения (2)

Группы параметров	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
Таежные	0,252	9,110	9,939	110,999	78,805
Луговые	1,413	27,045	33,905	2,390	5,449
Степные	1,451	13,137	20,414	0,012	-0,177
Тундровые	0,879	2,786	8,099	3,673	4,900
Торфяные	0,432	7,488	10,919	5,695	4,514
Сухостепные	0,210	1,490	11,440	11,120	7,530

В столбец Calc\_BD, помещаются расчетные значения плотности, вычисленные на основании отнесения образца к той или иной группе по формуле (2) с соответствующими параметрами. Для органогенных горизонтов используются экспертные оценки значений плотности. В столбец Calc\_BD1 помещаются расчетные значения плотности с их заменой на экспериментальные при наличии последних. Столбец Calc\_BD1 используется как источник данных для всех дальнейших расчетов.

*Гармонизация по профилю*

Данные о мощности горизонтов извлекаются из описаний разрезов в БД. Для каждого почвенного профиля рассчитываются запасы органического углерода для всех составляющих профиль слоев/горизонтов без пропусков до обеспеченной фактическими данными глубины. В тех случаях, где ряд слоев не является непрерывным возникает необходимость исправить геометрию слоев. При наличии зазоров между слоями создается условная граница горизонтов, пространство зазора делится пропорционально мощности образцов из верхнего и нижнего слоев, и каждая из частей относится к соответствующему горизонту. Исключением является верхняя граница органогенных горизонтов, которая берется не по верхней границе образца, а соответствует верхней границе горизонта в соответствии с описанием профиля. Аналогично, в качестве линии раздела органогенных и минеральных горизонтов берется нижняя граница органогенной толщи. Результаты этих манипуляций сохраняются в колонках Calc\_Top2 и Calc\_Bot2. Полученный объект мы называем горизонтом с уточненными

границами. В колонку Calc\_HORPWR помещается разность величин Calc\_Bot2 и Calc\_Top2. В ходе дальнейшей программной реализации мощность слоя почвы вычисляется динамически, в зависимости от взаимного расположения образца и границ исследуемого слоя.

Теперь мы в состоянии рассчитать запасы в произвольном слое с заданными верхней и нижней границей (например, слой от 30 до 50-ти сантиметров). Берутся все горизонты с уточненными границами, имеющие пересечение с заданным слоем. Для уточненного горизонта, не имеющего пересечения по высоте с границами слоя, берется его полная высота. В случае пересечения горизонта с верхней границей слоя при расчетах в качестве верхней границы горизонта берется верхняя граница слоя, аналогично при пересечении горизонта с нижней границей слоя.

Программа позволяет вычислять запасы органического углерода в произвольных слоях почвы, причем можно вычислить вклад органогенных и минеральных слоев отдельно. Основная часть вычислений запрограммирована в виде SQL-запросов к базе данных. Функция вычисления запасов реализована как скалярнозначная хранимая функция MS SQL Server 2016.

В процессе визуализации запасов углерода в зависимости от глубины происходит расчет запасов с шагом пять сантиметров и отрисовка результата на экране средствами пакета Embarcadero Delphi XE7 (рис. 1)

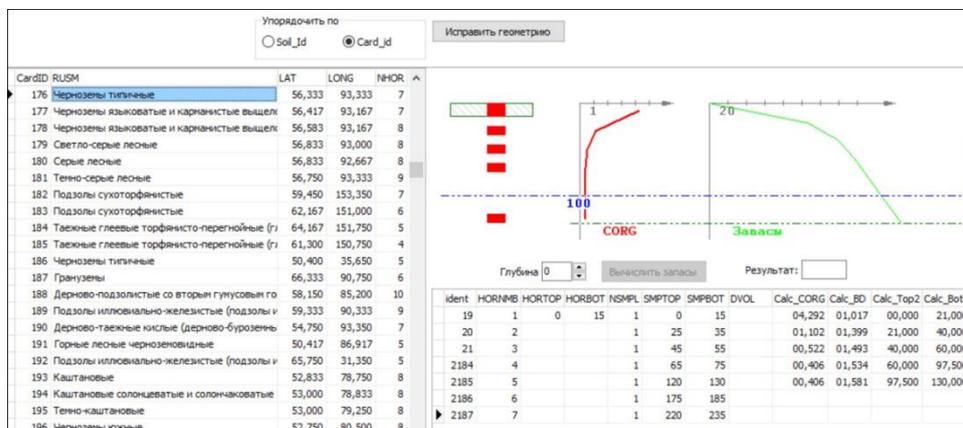


Рис.1. Пример визуализации изменения содержания (%) и запасов органического углерода (т/га) по профилям почв

## **Специальные условия и требования организационного, технического и технологического характера**

На сайте (<https://soil-db.ru/map?lat=55.9737&lng=46.6479&zoom=6>) реализована возможность поиска-запроса опорных разрезов с визуализацией их расположения на подложке ПК РФ. Запасы органического углерода для целевых глубин: 30, 30-50 и 50-100 см приводятся в отдельной таблице для каждого разреза, также в таблице приводятся границы органогенной и минеральной толщ по почвенному описанию и запасы органического углерода в органогенной и минеральной толщах. При отсутствии аналитических определений содержания органического вещества в органогенных горизонтах в таблице приводятся только границы горизонтов (рис. 2).

Технические решения организации вычислений дают возможность уточнять расчёты по мере поступления дополнительной информации за счет корректировки расчётных коэффициентов.

### **Условия передачи документации на разработку или условия ее продажи**

Результаты расчетов запасов углерода для всех почв, входящих в профильную атрибутивную базу данных ПГБД РФ могут быть предоставлены по запросу в Центр коллективного пользования учебно-научным оборудованием «Информационная система “Почвенно-географическая база данных России”» (<https://soil-db.ru/ckp>).

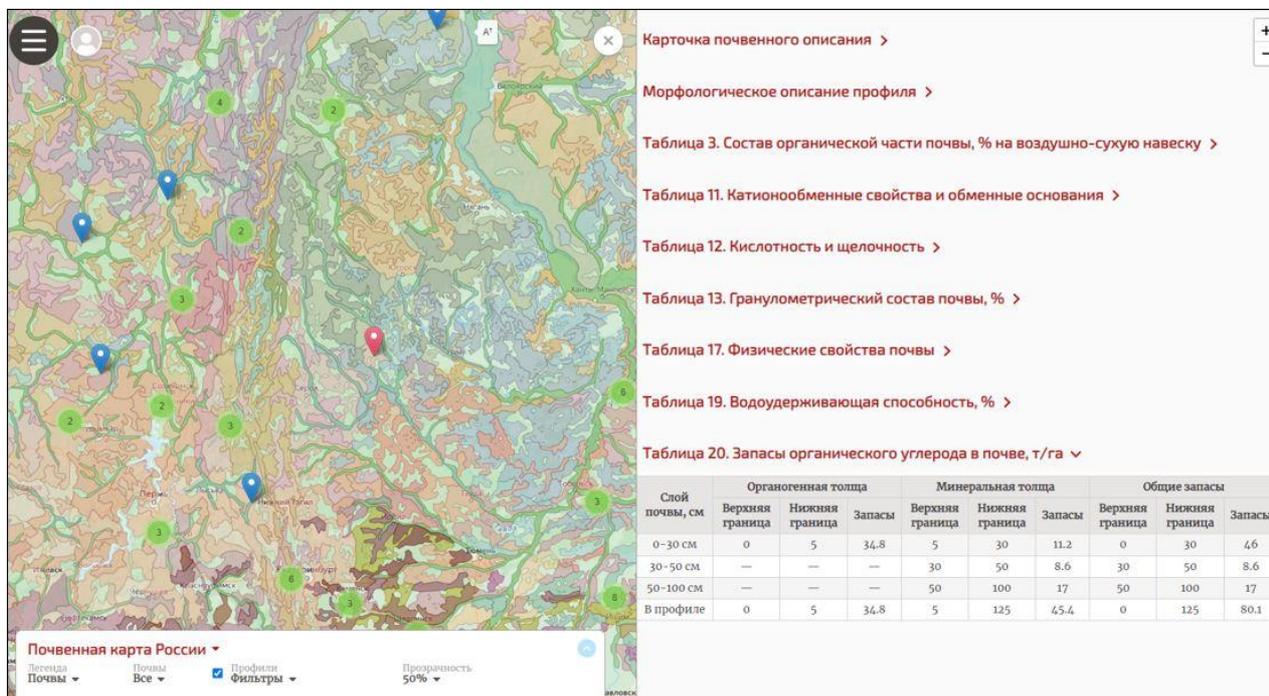


Рис. 2. Пример визуализации результатов расчета запасов органического углерода в конкретной почве на подложке ПК РФ на сайте Центра коллективного пользования «Информационная система “Почвенно-географическая база данных России”» (<https://soil-db.ru/map?lat=60.1597&lng=69.9719&zoom=6&profile=386>)

## Организации, которые могут быть заинтересованы в данном РИД

- Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации и субъектов РФ
- Региональные министерства сельского хозяйства РФ
- Научно-исследовательские организации и образовательные учреждения высшего образования

## Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-14-00107