

УДК 630.114.35:630.182.5.1+631.417(470)

**ЗАВИСИМОСТЬ ПЛОТНОСТИ ПОЧВЕННЫХ ГОРИЗОНТОВ  
ОТ ГЛУБИНЫ ИХ ЗАЛЕГАНИЯ И СОДЕРЖАНИЯ ГУМУСА\***© 2004 г. О. В. Честных<sup>1</sup>, Д. Г. Замолодчиков<sup>2</sup><sup>1</sup>Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН,  
117418, Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32<sup>2</sup>Биологический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова,  
119992 ГСП-2, Ленинские горы

Поступила в редакцию 25.04.2003 г.

Определены количественные формы зависимости плотности почвенного горизонта от глубины залегания и содержания в нем гумуса с учетом типа почвы. Приведены коэффициенты полученных уравнений. Рассмотрены результаты проверки уравнений на независимых данных, отмечено хорошее совпадение расчетных и экспериментальных величин. Рекомендуется использовать найденные уравнения во всех случаях, когда описание почвенного разреза не содержит информации по плотности почв.

**ВВЕДЕНИЕ**

За последнее десятилетие существенно увеличилось количество работ, в том числе и монографий, посвященных характеристике органического вещества почв России. Одно из важных направлений этих исследований – оценка роли почвенного покрова и почвенного гумуса в биосферном биогеохимическом цикле углерода и, посредством круговорота данного элемента, в комплексе процессов, известных под названием “глобальные климатические изменения”. Отсюда понятна актуальность определения общих запасов гумуса почв, как наиболее мощного резервуара органического углерода, исследование их роли в связывании или эмиссии парниковых газов.

Согласно Орлову и Бирюковой [3], термином “гумус” обозначается совокупность всех органических соединений в почвенном профиле, утративших связь с элементами структурной организации клеток и тканей, а термином “гумусонакопление” – процесс накопления в почве гумуса, охватывающий как отдельные горизонты, так и почвенный профиль в целом.

Существует два основных подхода к расчету запасов углерода в почве. В основу одних оценок положены обобщенные литературные данные различных авторов о средних запасах гумуса в т/га для метровой толщи почвы [2, 4], в основу других – оригинальные расчеты средних запасов гумуса с использованием данных о плотности различных горизонтов почвенного профиля [6, 7, 15].

Значительные трудности для проведения расчетов запасов органического углерода почв со-

здает отсутствие информации по плотности почв в большинстве описаний разрезов. Так, в работе Рожкова с соавт. [6] необходимые данные о плотности были получены на основе либо экспертных оценок, либо среднестатистических или единичных данных. Столбовой [15] отмечает, что именно недостаток данных по плотности почв может служить причиной существенного расхождения в итоговых значениях почвенных пулов углерода.

Авторы настоящей работы тоже столкнулись с проблемой нехватки информации по плотности при оценке запасов органического вещества в почвах лесной [10] и тундровой зон России [9]. В этих работах на основе имевшейся ограниченной информации были оценены средние значения плотности почвенных горизонтов для географических подзон и типов почв. Полученные средние значения использовались при расчетах массы почвенных горизонтов и запасов органического вещества в конкретных разрезах. Очевидно, что использованный подход мог привести к существенным неточностям, так как значения плотности существенно варьируют в почвах одного и того же типа и географической подзоны в зависимости от глубины залегания горизонтов, подстилающих пород, содержания гумуса в горизонте и прочих факторов.

Решение изложенной выше проблемы может лежать в нахождении количественных связей между плотностью и некоторыми другими характеристиками горизонтов, чаще встречающимися в исходных почвенных описаниях. Такими характеристиками могут быть глубина залегания горизонта и содержание в нем гумуса. Связь плотности горизонта с глубиной достаточно очевидна и в значительной степени определяется давлением со-

\* Исследования поддерживались проектом МЯ-47, МПР РФ, ГК МЯ-02-54/414.

стороны залегающих выше горизонтов. Гумус же обладает существенно меньшей плотностью, чем минеральная фаза почвы, и потому значительные его количества в гумусированных горизонтах приводят к невысокой плотности горизонтов. Таким образом, цель настоящей работы состоит в определении количественных форм зависимости плотности горизонта от глубины залегания и содержания в нем гумуса с учетом возможного влияния качественных факторов (тип горизонта, тип почвы, подстилающая порода, географическая подзона).

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Источником эмпирической информации служила оригинальная компьютерная база данных по характеристикам тундровых и лесных почв России. Она включает информацию по более чем 1000 почвенным разрезам из 300 литературных источников. Описание почвенного разреза в базе данных включает около 40 параметров, характеризующих географическое положение, строение почвенного профиля, физико-химические свойства почв, механический состав, валовый гранулометрический состав, содержание гумуса по горизонтам и т.д.

Из базы данных были выбраны описания разрезов, содержащие информацию по плотности почвенных горизонтов. В качестве элементарного объекта для анализа был использован горизонт почвы. Так как описание каждого разреза содержит информацию по нескольким горизонтам, то общее количество объектов анализа составило 748.

Следующий этап состоял в построении регрессионных уравнений, в которых глубина залегания горизонта и процентное содержание в нем гумуса выступали в качестве независимых переменных, а плотность – зависимой. Для этого сначала было необходимо идентифицировать математическую форму уравнений. Предварительный анализ литературных источников и информации базы показал, что плотность в верхних, гумусовых, горизонтах почвы бывает обычно минимальна при максимальной рыхлости, создаваемой корнями растений и роющей деятельностью живущих в почве насекомых и других мелких животных. В гумусовых горизонтах плотность равна 1.0–1.2 г/см<sup>3</sup>, в чисто органогенных горизонтах – в лесных подстилках и торфах – она уменьшается до 0.2–0.4 г/см<sup>3</sup>. В минеральных горизонтах величина плотности увеличивается до 1.3–1.6 г/см<sup>3</sup> и чаще всего до 1.4–1.5 г/см<sup>3</sup>. Наиболее высокая плотность (до 2.0 г/см<sup>3</sup>) наблюдается в глеевых горизонтах заболоченных почв.

Для аппроксимации количественных зависимостей был использован целый ряд уравнений:

гиперболические, степенные и логарифмические. Значения параметров уравнений рассчитывали с применением методов нелинейной регрессии. Адекватность полученных уравнений оценивали по коэффициенту детерминации ( $R^2$ ) и стандартной ошибке ( $SE$ ). При проведении статистического анализа был использован пакет статистических программ Statistica – 6.

Возможным способом повышения адекватности аппроксимации уравнений является оценка их не для всего массива данных, а его частей (категорий), выделенных по тому или иному признаку. Таковыми признаками являлись:

– географическая подзона: 1) тундра; 2) северная тайга; 3) средняя тайга; 4) южная тайга; 5) зона листопадных лесов;

– группа типов почв: 1) подзолистые; 2) дерновые; 3) серые, бурые, черноземы; 4) тундровые; 5) торфяные;

– группа подстилающих пород: 1) пески; 2) супеси; 3) глины; 4) суглинки; 5) щебень;

– тип горизонтов: 1) подстилка; 2) элювиальный; 3) иллювиальный; 4) материнский, глеевый; 5) торфяной.

В категории торфяные почвы расчет проводился по приведенному в источнике процентному содержанию гумуса. В этой категории представлены торфяно- и торфянисто-болотные, а также торфяно-подзолисто-глеевые почвы.

Таким образом, при использовании любого признака исходный массив данных подразделяли на 5 категорий, однако число объектов в каждой из категорий существенно варьировало. Уравнения были рассчитаны как для всего массива данных в целом, так и отдельно по всем приведенным выше категориям подразделения данных.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

*Форма уравнения для аппроксимации значений плотности почв.* Глубина залегания горизонта может быть охарактеризована по его верхней границе, нижней границе и средней глубине его залегания. Наибольшую сопряженность с величинами плотности показала средняя глубина ( $MID$ ), поэтому в дальнейшем под глубиной будет пониматься именно  $MID$ . Наилучшим образом связь плотности ( $BW$ ) и  $MID$  описывается трехпараметрическим гиперболическим уравнением (рис. 1, I):

$$BW = a_1 - a_2 / (MID + a_3). \quad (1)$$

Параметры уравнения имеют достаточно простой физический смысл.  $a_1$  – характеризует максимальную плотность,  $a_2$  и  $a_3$  – определяют скорость изменения от минимальной к максимальной плотности с увеличением глубины.

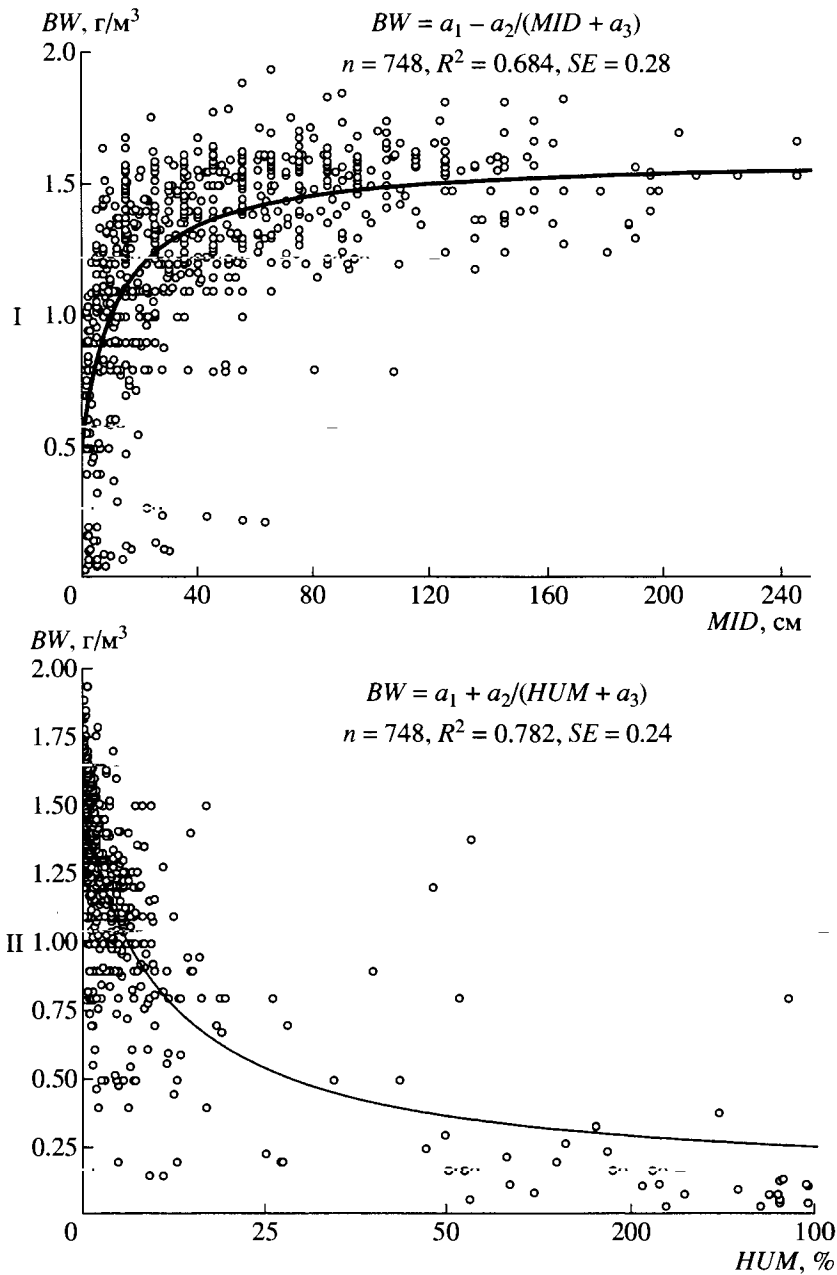


Рис. 1. Однофакторная аппроксимация величин плотности почвенных горизонтов в зависимости от середины глубины горизонта (I) и содержания гумуса (II).

Связь плотности с содержанием гумуса также описывается гиперболическим уравнением (рис. 1, II):

$$BW = a_1 + a_2/(HUM + a_3). \quad (2)$$

В данном случае  $a_1$  соответствует минимальной плотности,  $a_2$  и  $a_3$  определяют скорость изменения от минимальной к максимальной плотности с увеличением содержания гумуса.

Коэффициенты детерминации составляют 0.684 для уравнения (1) и 0.782 для уравнения (2), то есть недостаточно высоки. Поэтому было

предложено уравнение с пятью параметрами, аппроксимирующее величину плотности в зависимости от двух факторов (рис. 2):

$$BW = a_1 - a_2/(MID + a_3) + a_4/(HUM + a_5), \quad (3)$$

где  $BW$  – плотность почвенного горизонта, г/см<sup>3</sup>;  $MID$  – глубина залегания горизонта, см;  $HUM$  – содержание гумуса в горизонте, %;  $a_1 - a_5$  – параметры уравнения. Коэффициент детерминации уравнения (3) составляет 0.828, что заметно выше по сравнению с уравнениями (1) и (2).

$$\bar{B}\bar{W} = a_1 - a_2j(\text{MID} + a_3) + a_4j(\text{HUM} + a_5)$$

$$n = 748, R^2 = 0.828, SE = 0.21$$

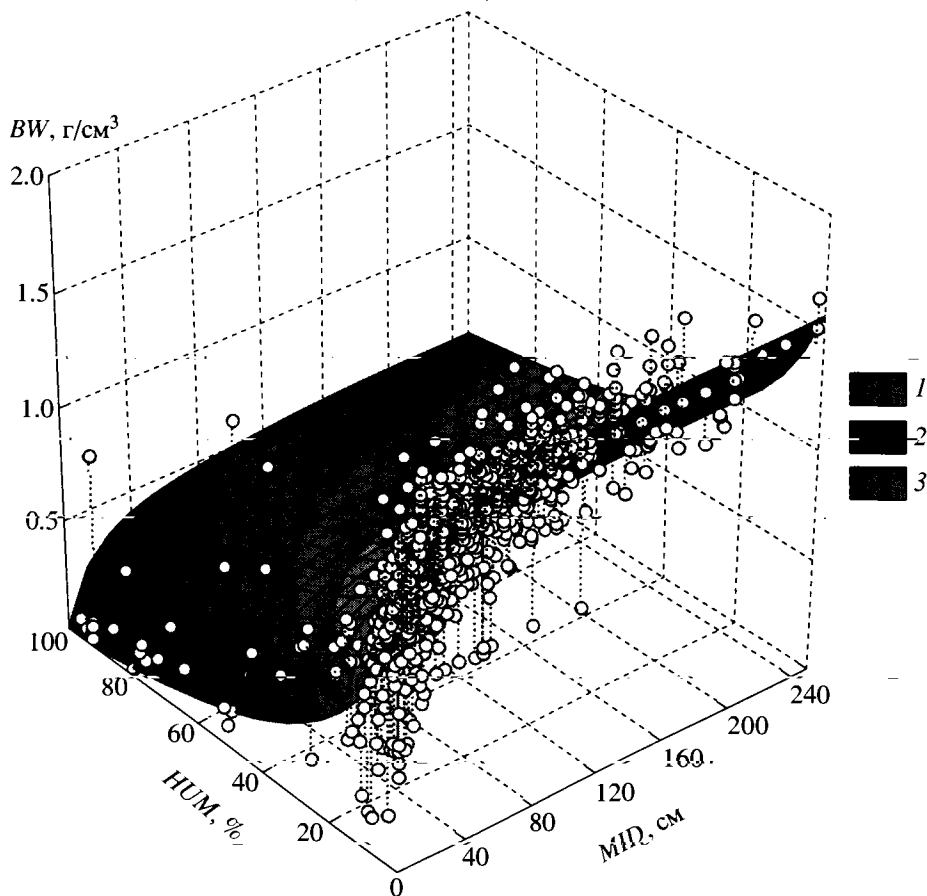


Рис. 2. Двухфакторная аппроксимация величин плотности почвенных горизонтов в зависимости от середины глубины горизонта и содержания гумуса. 1 – 1.5; 2 – 1; 3 – 0.5 г/м<sup>3</sup>.

Аппроксимация уравнений для различных категорий. Возможным способом улучшения качества аппроксимации (то есть увеличения  $R^2$  и уменьшения  $SE$ ) величин плотности почвенных горизонтов является нахождение уравнений (1–3) для различных качественных категорий, на которые можно разделить исходный массив данных. Основу для деления по категориям дает информация о типе почвы, типе горизонта, типе подстилающей породы и географической подзоне.

Отметим, что для адекватной оценки параметров необходимо достаточное количество данных для всех выделенных категорий. Общее количество данных в массиве исходной информации составляет 748, для отдельных выделенных категорий оно варьирует от 17 до 421.

Для всех выделенных категорий была осуществлена аппроксимация коэффициентов уравнений (1–3). В табл. 1 приведены коэффициенты детерминации ( $R^2$ ) и стандартной ошибки уравнений для всех рассмотренных категорий. Для

одной переменной значения  $R^2$  варьируют от 0.08 до 0.93 (зависимость от глубины горизонта) и от 0.11 до 0.84 (зависимость от содержания гумуса). В то же время для двух переменных коэффициенты детерминации изменяются от 0.14 до 0.95.

Вариации  $R^2$  по категориям вполне объективны: в наибольшей степени плотность почвенных горизонтов может быть связана с географической изменчивостью (в северной полусфере преобладают более тяжелые глеевые почвы, в средней – подзолистые, в южной – гумусированные). В наименьшей степени плотность связана с типом почвенного горизонта, один и тот же тип горизонта разных почв может иметь существенно различную плотность (например, гор. В для тундровых глеевых может иметь значение 1.3–1.4, в то время как для лесных подзолистых почв 0.9–1.1).

При одновременном рассмотрении  $R^2$  и  $SE$  можно отметить, что наиболее адекватно описывают массивы экспериментальных данных уравнения в категории типов почв. Значения параметра

**Таблица 1.** Средние\* коэффициенты детерминации ( $R^2$ ) и стандартные ошибки ( $SE$ ) регрессионных уравнений при определении плотности почвенных горизонтов в зависимости от глубины залегания и содержания гумуса при разной основе для выделения категорий

Параметр	Статистика	Основа для выделения категорий			
		тип горизонта	подстилающая порода	тип почвы	географическая подзона
Содержание гумуса, %	$R^2$	0.49	0.75	0.73	0.73
	$SE$	0.15	0.23	0.21	0.25
Глубина залегания, см	$R^2$	0.29	0.68	0.73	0.72
	$SE$	0.17	0.28	0.23	0.26
Обе переменные	$R^2$	0.53	0.77	0.82	0.83
	$SE$	0.15	0.22	0.18	0.21

\* Усреднение по пяти категориям для каждого способа подразделения исходных данных.

**Таблица 2.** Параметры регрессионных уравнений, связывающих значение плотности почвенного горизонта  $BW$  с глубиной залегания  $MID$  и содержанием гумуса  $HUM$  для разных категорий типов почвы

Категория	Параметры					Число разрезов	$R^2$
	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$		
$BW = a_1 - a_2/(MID + a_3)$							
Подзолистые	1.623	7.181	5.257	—	—	274	0.83
Дерновые	1.853	34.319	31.065	—	—	81	0.64
Серые	1.552	22.554	32.199	—	—	204	0.67
Тундровые	1.645	15.674	18.340	—	—	111	0.81
Торфяные	1.978	64.597	31.397	—	—	78	0.66
Уравнение $BW = a_1 + a_2/(HUM + a_3)$							
Подзолистые	0.268	9.556	7.391	—	—	274	0.60
Дерновые	0.672	4.392	4.786	—	—	81	0.83
Серые	1.064	0.246	0.276	—	—	204	0.58
Тундровые	0.720	4.021	4.545	—	—	111	0.90
Торфяные	0.081	5.369	3.427	—	—	78	0.75
Уравнение $BW = a_1 - a_2/(MID + a_3) + a_4/(HUM + a_5)$							
Подзолистые	0.252	9.110	9.939	110.999	78.805	274	0.87
Дерновые	1.413	27.045	33.905	2.390	-5.449	81	0.87
Серые	1.451	13.137	20.414	0.012	-0.177	204	0.72
Тундровые	0.879	2.786	8.099	3.673	4.900	111	0.93
Торфяные	0.432	7.488	10.919	5.695	4.514	78	0.76

тров  $a_1$ – $a_5$  в этом случае положительны, за исключением  $a_1$  для категории “серых” почв (табл. 2).

Проверка уравнений на независимых наборах экспериментальных данных. Наличие экспериментальных данных, не использованных при аппроксимации коэффициентов (табл. 2), позволяет осуществить проверку полученных уравнений.

Были рассмотрены: группа аллювиальных почв долины реки Селенга [8]; криоморфные

почвы Витимского плоскогорья [1]; черноземы Украины [5].

На рис. 3 приведены сравнительные графики для некоторых почвенных разрезов. По оси абсцисс отложены средняя глубина горизонта, наибольшая для тундровых почв (до 135 см), наименьшая (до 95 см) – для черноземов. Сравнение расчетных значений с независимыми данными дает основание заключить, что предложенные уравнения для определения плотности различных

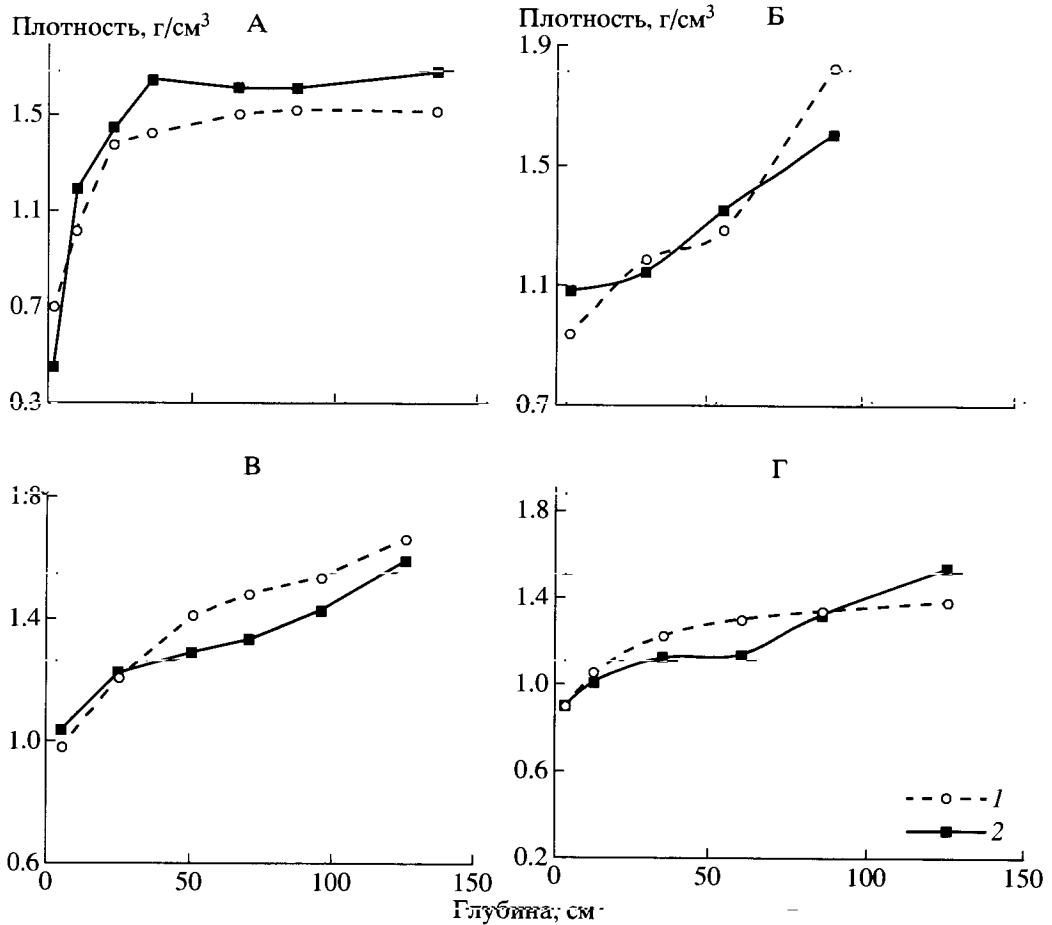


Рис. 3. Оригинальные и расчетные данные по плотности почвенных горизонтов для различных типов почв, г/см<sup>3</sup>: А – тундровые почвы, Витимский край [1]; Б – черноземы [5]; В – дерновые почвы, Селенга [8]; Г – серые почвы, Селенга [8]. 1 – расчетные, 2 – экспериментальные данные.

типов почв вполне удовлетворительно описывают динамику плотности почв по глубине. Небольшие различия наблюдаются для тундровых и дерновых почв на глубинах более 50 см, что может быть связано с варьированием более плотного элювиального горизонта в конкретном разрезе. Напротив, для черноземов расхождения наблюдаются в самых верхних и нижних горизонтах, что может быть объяснено как отсутствием самого верхнего гор. А0, так и превышением среднего содержания гумуса в нижних слоях в данном разрезе. Для серых почв имеет место вполне удовлетворительное описание экспериментальных данных, небольшие расхождения, не превышающие 10%, наблюдаются на глубинах около 50 см. Отметим, что значениям плотности в самом верхнем горизонте почвенного разреза свойственны некоторые колебания, объясняемые различиями как в методике описания разреза (включение или исключение гор. А0), так и в степени разложения органического вещества подстилки.

На рис. 4 приведены результаты сравнения всех независимых и расчетных данных по плотности почвенных горизонтов. В области значений плотности до 1.0 г/см<sup>3</sup>, что свойственно верхним горизонтам почвенного разреза, расчетные значения несколько превышают экспериментальные. В этой части наблюдается большой разброс данных (рис. 1) и определение плотности почв по уравнению может привести к некоторому завышению величин. В области же, превышающей значения 1.0 г/см<sup>3</sup>, экспериментальные и расчетные данные расположены достаточно близко по отношению к прямой  $y = x$  с небольшими отклонениями в сторону занижения расчетных данных. В целом сравнение расчетных и независимых экспериментальных данных позволяет сделать вывод об удовлетворительной адекватности полученных уравнений.

Двухфакторные уравнения могут быть использованы для расчетов значений недостающих данных только при наличии информации по содержанию гумуса. При отсутствии этой информа-

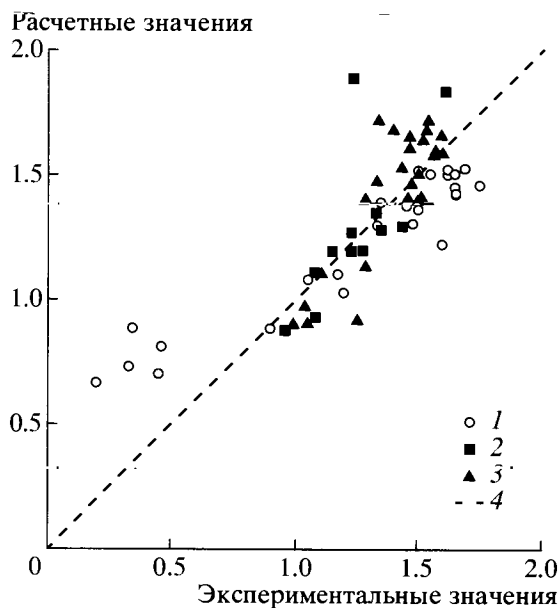


Рис. 4. Сравнение оригинальных и расчетных данных по плотности почвенных горизонтов различных типов почв, г/см<sup>3</sup>: 1 – тундровых; 2 – черноземов; 3 – дерновых; 4 – линия  $x = y$ .

ции можно рассчитать плотность, опираясь только на глубину почвенного горизонта (табл. 2), хотя это и приведет к большим отклонениям при аппроксимации плотности конкретного горизонта.

Использованный в настоящей работе методический прием, связанный с расчетом плотности на основе тех или иных физических и химических свойств почвы, неоднократно применялся в зарубежных исследованиях. Для почв Англии предложены [12] линейные регрессионные уравнения первого порядка, описывающие плотность в зависимости от комплекса физических свойств почвы (гранулометрический состав, влагоемкость, число пластичности и др.). Линейные регрессионные уравнения для плотности в зависимости от гранулометрического состава и содержания органического вещества использовались для исследований влияния антропогенной нагрузки на почвы сельскохозяйственных земель Швеции [11]. Коэффициенты детерминации уравнений, оцененных в этих работах, оказались существенно ниже приведенных в настоящей статье из-за использования линейных зависимостей. Более реалистичная степенная зависимость, включающая в качестве независимых переменных удельное сопротивление почвы, глубину и влажность, предложена для почв центральной Испании [13]. Коэффициенты детерминации для этой зависимости составляют от 0.74 до 0.87, что очень близко к приведенным в табл. 2 величинам. Сложные степенные и гиперболические функции связи плотности с глубиной и гранулометрическим составом применялись в

исследованиях процессов увлажнения–высыхания в почвах Германии [14]. Таким образом, глубина горизонта и содержание гумуса (органического вещества) достаточно часто используются в мировой практике для аппроксимации плотности почв.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определение значений плотности почвенных горизонтов обеспечивает расширение возможностей использования описаний разрезов для решения широкого круга задач. Оно позволяет перейти от единиц процентного содержания вещества (гумуса, углерода, азота и так далее) к единицам массы. В настоящее время оценки пулов являются особо актуальными по отношению к углероду, что связано с проблемой изучения глобального углеродного цикла, в свою очередь индуцированной проблемой глобальных изменений климата. В процессе разработки углеродной проблемы все большее внимание начинает уделяться циклам азота и других биогенных элементов как важнейших регуляторов продукционных и деструкционных процессов. В зависимости от поставленной задачи, предложенные уравнения позволяют использовать огромную информацию, содержащуюся в описаниях почвенных разрезов и в недостаточной степени используемую из-за невозможности перевода процентных содержаний в общие количества.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вторушин В.А., Пигарева Н.Н. Криоморфные почвы: перспективы их эффективного использования. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 1996. 294 с.
2. Кобак К.И. Биотические компоненты углеродного цикла. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 248 с.
3. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н. Запасы углерода органических соединений в почвах Российской Федерации // Почвоведение. 1995. № 1. С. 21–32.
4. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И. Органическое вещество почв Российской Федерации. М.: Наука, 1996. 256 с.
5. Почвы УССР. Киев: Изд-во сельхоз. лит-ры, 1951. 320 с.
6. Рожков Р.А., Вагнер В.В., Кагут Б.М., Конюшков Д.Е., Шеремет Б.В. Запасы органических и минеральных форм углерода в почвах России // Углерод в биогеоценозах: Чтения памяти акад. В.Н. Сукачева. М.: Наука, 1997. С. 5–58.
7. Титлянова А.А., Булавко Г.И., Миронычева-Токарева Н.П., Хвоцкая М.Ф. Запасы органического углерода в почвах Западной Сибири // Почвоведение. 1994. № 10. С. 49–53.
8. Убугунова В.И., Убугунов Л.Л., Корсунов В.М., Балабко П.Н. Аллювиальные почвы речных до-

- лин бассейна Селенги. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 1998. 254 с.
9. Честных О.В., Замолодчиков Д.Г., Карелин Д.В. Запасы органического вещества почв и углерода в тундровых и лесотундровых экосистемах России // Экология. 1999. № 6. С. 426–432.
  10. Честных О.В., Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Коровин Г.Н. Распределение запасов органического углерода в почвах лесов России // Лесоведение. 1999. № 2. С. 13–21.
  11. Arvidsson J. Influence of soil texture and organic matter content on bulk density, air content, compression index and crop yield in field and laboratory compression experiments // Soil and Tillage Research. 1998. V. 49. P. 159–170.
  12. Ball B.C., Campbell D.J., Hunter E.A. Soil compactibility in relation to physical and organic properties at 156 sites at UK // Soil and Tillage Research. 2000. V. 57. P. 83–91.
  13. Hernanz J.L., Peixoto H., Cerisola C., Sánchez-Giron V. An empirical model to predict soil bulk density profiles in field conditions using penetration resistance, moisture content and soil depth // Journal of Terramechanics. 2000. V. 37. P. 167–184.
  14. Roth C.H. Bulk density of surface crusts: depth functions and relationships to texture // Catena, 199. V. 29. P. 223–237.
  15. Stolbovoi V. Carbon in Russian soils // Climatic Change. 2002. V. 55. № 1–2. P. 131–156.

## Bulk Density of the Horizons of Taiga and Tundra Soils as Dependent on Their Humus Content

O. V. Chestnykh and D. G. Zamolodchikov

Quantitative parameters of the dependence of the bulk density of soil horizons on their humus content have been determined for the particular soil types of the forest and tundra zones. The corresponding regression equations are suggested. These equations have been validated using a statistical sample of independent data. Good agreement between the calculated and experimental data is observed. It is recommended that these equations should be used to estimate the bulk density of soil horizons in all the cases when the description of soil pits does not contain this information.