

УДК 631.417.1+631.445.124

## РАСЧЕТНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛЕРОДА В ТОРФАХ И МОХОВЫХ ПОДСТИЛКАХ ЛЕСНЫХ БОЛОТ ПО ЗОЛЬНОСТИ РАСТИТЕЛЬНОГО СУБСТРАТА

Т. Т. Ефремова, А. Ф. Аврова, С. П. Ефремов

Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – Обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН  
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28

E-mail: efr2@ksc.krasn.ru, avrova@ksc.krasn.ru, efr2@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 01.03.2016 г.

Изучали ельники заторфованной долины р. Тунггуль и болотного массива вблизи оз. Агаскыр (долина р. Печище, бассейн р. Черный Июс) в низкогорной части Кузнецкого Алатау. Объекты относятся к группе высокозольных пойменных торфяников криогенного ряда развития. Выполнили оценку отклика органического углерода на связанные между собой физико-химические показатели – степень разложения, зольность, плотность ( $r = 0.5-0.7$ ), которые в отличие от углерода несложно определяются аналитически. Полученные результаты, согласно пошаговому регрессионному анализу, характеризуют сильную обусловленность углерода предикторами: индекс множественной детерминации  $R^2 = 0.86$ . Наиболее высокий частный коэффициент корреляции с откликом имеет зольность в диапазоне (5–68 %). Значения частных коэффициентов корреляции плотности и степени разложения недостоверны. О сильной связи содержания углерода и зольности органического субстрата свидетельствуют высокосignificance индекс детерминации ( $R^2 = 0.93$ ), а также константа и отрицательный коэффициент парной регрессионной модели. Относительная ошибка аппроксимации находится в интервале 2–8 % и характеризует высокую точность прогноза. Включение только одного показателя (зольности) в расчетную формулу делает ее удобной и несложной в практическом применении для прогноза содержания углерода в лесной подстилке, торфяных почвах, погребенных торфах и торфяно-минеральных образованиях зольностью 5–68 %. Впервые приводится геохимическая характеристика торфяной залежи лесных болот межгорных котловин Кузнецкого Алатау.

**Ключевые слова:** органический углерод, физико-химические показатели, множественный и парный регрессионный анализ, болотные ельники, торфяная залежь.

DOI: 10.15372/SJFS20160607

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных задач современного периода является оценка роли болот в глобальном изменении климата. Болотным экосистемам как крупным резервуарам органического углерода и ощутимого источника  $\text{CO}_2$  принадлежит важная роль в поддержании газового баланса атмосферы (Ефремов и др., 1994; Орлов и др., 1996; Tolonen, Turunen, 1996; Вомперский и др., 1999; Belyea, Malmer, 2004; Vasander, Kettunen, 2006; Дюкарев, Головацкая, 2008; Инишева и др., 2012).

Лесоболотные комплексы относятся к числу сложных природных образований. При изучении объектов такого уровня невозможно обойтись без методов математической статистики, позволяющих поставить экспериментальные исследования на точную количественную основу. Однако в параметризации процессов трансформации органического углерода сохраняется много нерешенных проблем из-за недостаточного количества экспериментальных данных. Имея дело со сложной системой, исследовать на основе полного набора ключевых параметров объективно невозможно, поэтому следу-

ет сосредоточить внимание на конкретных задачах, позволяющих получить четкие ответы на ограниченный набор вопросов (Сердюцкая, 2009). В этой связи, на наш взгляд, необходимо совершенствование методов определения углерода – основного элемента органической части торфов. Существующие методики либо связаны с трудоемкими аналитическими определениями в агрессивной среде концентрированной серной кислоты и соединений хрома, либо базируются на использовании дорогостоящих приборов.

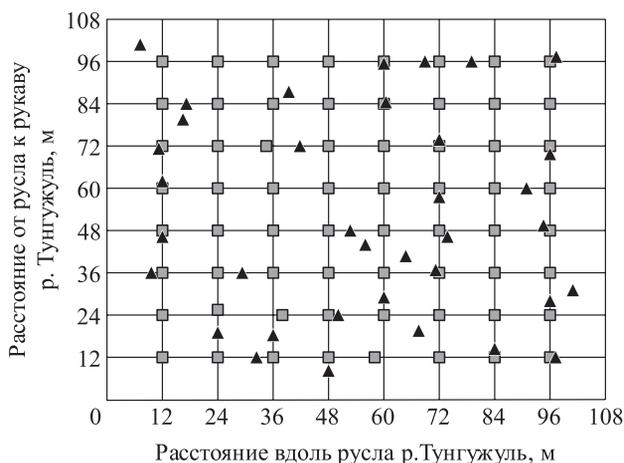
Между тем стоящие перед исследователем задачи можно решить с помощью математического моделирования, позволяющего избежать этих сложностей и ускорить процесс получения нужной информации. Среди успешно решаемых статистическими методами задач особое место занимает количественная оценка взаимной изменчивости признаков, осуществляемая с помощью регрессионного анализа. Регрессионный анализ является одним из методов статистического моделирования. Моделью в данном случае является уравнение регрессии, параметры (коэффициенты) которого рассчитываются в ходе математического анализа. Такая модель именуется регрессионной.

Пул органического углерода в торфяных залежах опосредованно проявляется в ряде показателей, несложно определяемых аналитически, таких как степень разложения, зольность и плотность.

Цель исследований – выявление возможности прогнозирования содержания органического углерода на основе анализа его статистической связи с физико-химическими свойствами лесных торфяных почв. Общие задачи: определить тесноту и характер взаимосвязи углерода с зольностью, степенью разложения, плотностью лесных подстилок и торфяного субстрата, выявить статистически значимый предиктор, проверить гипотезу о значимости регрессии, оценить параметры и адекватность модели, построить доверительные интервалы для прогнозируемых значений, оценить точность аппроксимации и обозначить пределы использования предлагаемого способа прогнозирования.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в низкогорной части Кузнецкого Алатау, в заторфованной долине р. Тунгжуль (правый приток р. Белый Июс). Торфяник пронизан также сетью водото-



**Рис. 1.** Схема отбора образцов торфяной почвы. Точки отбора: квадраты – основные, треугольники – дополнительные, отобранные случайным образом.

ков второго и третьего порядка (рукавов). Торфяной массив занят еловыми насаждениями, в напочвенном покрове которых абсолютно доминируют гипновые и зеленые мхи с проективным покрытием 100 %. Болото относится к группе высокозольных пойменных торфяников криогенного ряда развития. Торфяная залежь и минеральное дно постоянно проморожены, максимальная глубина оттаивания в августе составляет 52 см. Неглубокое залегание ледового водоупора обуславливает низкие температуры и избыточное увлажнение почвы.

Питающие торфяник воды – аллювиальные, делювиальные и надмерзлотная верховодка – имеют слабощелочную реакцию среды и гидрокарбонатный кальциево-магниевый состав (Ефремова и др., 2015).

Пробную площадь (ПП) заложили между основным руслом р. Тунгжуль и ее правым рукавом. Для отбора образцов проложили 8 параллельных линий в направлении от русла к рукаву речки с шагом 12 м. Аналогичную разбивку провели в перпендикулярном направлении. Пересечение этих линий определило 64 точки отбора, дополнительно случайным образом выбрали еще 36. В итоге отобрали 100 монолитов торфяного субстрата (0–20 см), равномерно распределенных по всей ПП размером 1.2 га (рис. 1).

С целью оценки микрорельефа по градиенту проложенных линий через каждые 50 см с помощью нивелира типа Н-05 и буссоли выполнили замеры относительных высот поверхности торфяника. В пределах ПП превышение относительных отметок от рукава к руслу внутри-

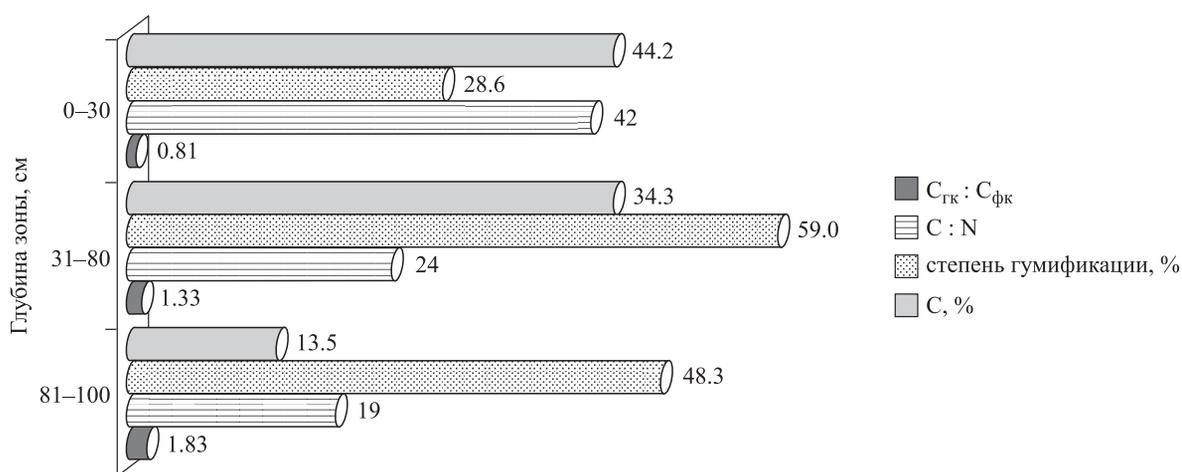


Рис. 2. Гумусовый профиль торфяного массива долины р. Тунгужуль.

лотной речки составляет в среднем 0.35 м, что соответствует  $0.2^\circ$ . Изменение микрорельефа, различия высотного уровня и уклона поверхности торфяника, отдаленность от русла и глубина его врезанности определяют дренажную способность, а также количество минерального аллювиального и аллохтонного материала, поступающего извне. Вдоль русла отмечена наибольшая концентрация минеральных примесей, по мере удаленности в глубь массива она снижается и вновь слабо возрастает к рукаву внутриболотной речки. В питании торфяника участвует также эоловая пыль, дополнительно обогащающая торфяную почву зольными элементами. Гидрологический и температурный режимы участка характеризуются неоднородностью. Дренированность максимально выражена вдоль основного русла, слабее – возле рукава речки. Срединная часть междуруслового пространства наиболее увлажнена.

Для эколого-геохимической характеристики криогенной торфяной залежи под ельником зеленомошно-гипновым использован оттаявший профиль берегового вала южной экспозиции. Профиль маломощного торфяного массива 0–95 (100) см визуально четко разделяется на три зоны. Верхняя 0–20 (30) см (торфогенный слой) – современная торфяная почва, включающая моховую подстилку мощностью в среднем 10–15 см. Торфогенный слой рыже-бурого цвета, рыхлый, слагается главным образом моховым очесом слабой и средней степени разложения. Выделяются прослойки (2–3 см) сильно мацерированных древесных остатков (хвои и мелких веточек) темно-серо-бурого, почти черного цвета. Много ватообразной и точечной белесоватой

плесени. Присутствуют живые корни. Средняя зона 30–80 см (погребенные торфяные почвы) – почти черная гумусированная растительная масса с включением сильно мацерированных остатков древесного опада и мхов преимущественно темно-бурого цвета, обильно пронизанная белесоватой плесенью. В пределах 30–50 см много тонких физиологически активных корней, в нижней части – крупных фрагментов разложившейся древесины рыже-бурой окраски, на долю которых приходится по объему около 40 %. Слабовыраженная зернисто-творожистая структура в виде гнезд. Нижняя зона 80–95 (100) см (подстилающая порода) торфяно-минерального состава – темно-бурый однородный субстрат, мажущийся при растирании, рыхлый, слабовыраженной комковатой структуры. Глубже 95 (100) см минеральный грунт светло-серого и серого цвета, плотного сложения, пропитан гумусом в виде языков темно-серого цвета. Присутствуют линзы мерзлоты.

Зона современного почвообразования характеризуется наименее переработанным органическим веществом: низкой степенью гумификации (сумма гуминовых и фульвокислот) – 29 %, гуматно-фульватным типом гумуса –  $C_{тк} : C_{фк} = 0.81$  и слабой обогащенностью азотом, судя по широкому отношению  $C : N = 42$  (рис. 2).

Органическое вещество погребенных торфяных почв пополнено азотом и содержит максимальное в пределах стратиграфического профиля количество гумусовых веществ фульватно-гуматного типа. Нижняя зона торфяно-минерального состава гуматного типа характеризуется высокой обогащенностью азотом.

**Таблица 1.** Валовое содержание минеральных компонентов и физико-химические показатели заторфованной долины р. Тунгужуль, занятой ельником зеленомошно-гипновым

Глубина, см	Физико-химические показатели			Оксиды макроэлементов, %				Микроэлементы, мг/кг					
	Зольность, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>	pH	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Cu	Zn	Ni	Pb	Co	Cr
<i>Торфогенный слой – зона современного почвообразования</i>													
0–10(15)	8.1	0.015	6.2	0.3	0.5	2.6	0.5	5.2	29.4	3.6	5.3	0.9	2.5
11–20(30)	16.7	0.070	6.7	1.0	0.9	5.2	1.1	12.1	34.7	7.1	8.7	2.9	4.6
Среднее	12.4	0.040	6.5	0.7	0.7	3.9	0.8	8.7	32.1	5.4	7.0	1.9	3.6
<i>Торфяная залежь – погребенные почвы</i>													
31–54	29.5	0.157	7.4	1.6	2.1	11.6	1.5	14.6	28.7	7.1	4.3	4.3	7.0
55–66	31.3	0.202	7.8	1.3	1.8	15.5	2.2	12.6	22.0	8.2	2.3	3.5	5.1
67–80	31.9	0.240	7.9	0.6	1.5	17.0	2.2	12.1	17.2	7.0	1.4	3.2	5.4
Среднее	30.9	0.200	7.7	1.2	1.8	14.7	2.0	13.1	22.6	7.4	2.7	3.7	5.8
<i>Подстилающие породы</i>													
81–95	60.3	0.459	7.9	5.9	7.1	3.3	2.2	29.6	57.5	26.8	5.6	11.2	18.0
96–110	87.4	1.111	8.0	4.3	3.5	7.8	2.3	23.0	38.4	20.0	4.4	8.4	14.3
Среднее	73.8	0.790	8.0	5.1	5.3	5.6	2.2	26.3	47.9	23.4	5.0	9.8	16.1

Торфогенный слой четко выделяется и по физико-химическим параметрам: характеризуется нормальной зольностью (в среднем 12 %), низкой плотностью (0.04 г/см<sup>3</sup>), слабокислой реакцией среды, наиболее низким содержанием оксидов железа и алюминия (0.7 %) и щелочно-земельных оснований: CaO – около 4 %, MgO – 0.8 % (табл. 1).

В глубине, в зоне погребенных торфяных почв, показатели среды в большинстве своем повышаются в 2–3 раза, еще в большей мере – плотность (в 5 раз) и содержание оксида кальция (почти в 4 раза), а реакция среды становится щелочной. В подстилающих породах торфянисто-минерального состава щелочные условия среды сохраняются, продолжают увеличиваться плотность, зольность и концентрация минеральных элементов. Исключение составляет оксид кальция. Его количество снижается почти в 3 раза, приближаясь к показателям верхнего торфогенного слоя. Содержание щелочных металлов в пределах стратиграфической колонки незначительное: K<sub>2</sub>O – 0.28–0.32 %, Na<sub>2</sub>O – 0.05–0.08 %.

Концентрация микроэлементов (Cu, Zn, Ni, Pb, Co и Cr), как и макроэлементов, возрастает с глубиной торфяной залежи. Исключение составляют Pb и Zn, которые максимально сосредоточены в зоне современных почв. В метровой толще горных торфяников юга Сибири содержание Ni и Cu приближается к кларкам низинных торфяников Нечерноземной зоны европейской

части (Крештапова, 1991), а количество Zn, Pb, Co, Cr больше в 2–3 раза.

Содержание углерода определяли на элементном анализаторе FLASH<sup>TM</sup>1112 (производитель Thermo Quest Italia), плотность торфа – методом режущего кольца, степень разложения – по Н. И. Пьявченко (1963), зольность – сжиганием навески в муфельной печи при температуре 900 °С, азот – по Кьельдалю (Аринушкина, 1962). Групповой и фракционный состав органического вещества анализировали согласно В. В. Пономаревой, Т. А. Николаевой (1961). Валовое содержание тяжелых металлов в торфе определено атомно-адсорбционным методом (Методические указания..., 1992).

В статистический анализ включено 100 образцов торфяного субстрата с глубины 0–20 (30) см, отобранных в пределах ПП по схеме. В соответствии с градацией Н. И. Пьявченко (1963), образцы представлены торфяными (зольность ниже 50 %) и минерально-торфяными (52–68 %) почвами.

Аппроксимация связи содержания углерода с зольностью органического материала, а также предложения по использованию полученных уравнений основаны на традиционных методах регрессионного анализа (Дрейпер, Смит, 1986; Дерффель, 1994). Статистическую обработку и построение графических иллюстраций выполняли с помощью стандартных пакетов программ Microsoft Excel 2003, STATISTICA 6, Surfer 6.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Физико-химические показатели современных торфяных почв (0–20 см) под ельником зеленомошно-гипновым согласно коэффициенту вариации характеризуются значительным варьированием зольности, содержание которой изменяется в пределах 5–68 %, и плотности – 0.019–0.245 г/см<sup>3</sup> (табл. 2).

Значительное варьирование показателей зольности в пределах одного болотного массива обусловлено неравномерным распределением аллювия и делювия в период торфообразования, что закономерно для торфяников пойменной группы (Пьявченко, 1958). Средним варьированием отличаются содержание углерода (27–56 %) и степень разложения торфа (12–35 %). Вместе с тем в пределах ПП протяженностью 108 м, заложенной в междурядном пространстве, прослеживается определенная сопряженность в изменении физико-химических свойств торфяной залежи. Так, зольность и плотность торфяного субстрата резко снижаются от берегового вала примерно до середины торфяного массива, а затем слабо возрастают по мере приближения к рукаву речки (рис. 3, а, б).

Тренды содержания углерода и степени разложения торфа в силу меньшей вариабельности этих показателей выражены не столь явно. Тем не менее в сравнении с зольностью и плотностью торфяного субстрата углерод обнаруживает противоположную тенденцию: его минимальное количество определяется вдоль русла речки, плавно возрастает к середине ПП и несколько снижается в направлении рукава (рис. 3, в). Степень разложения торфа вдоль дренирующих потоков примерно сходная – средняя, а ближе к середине междурядного пространства снижается (рис. 3, г).

*Множественный регрессионный анализ.* Чтобы совокупно оценить отклик органического углерода на физико-химические показатели – зольность, степень разложения и плотность торфяного субстрата, в той или иной мере связанные между собой ( $r = 0.5–0.7$ ), выполнили пошаговый регрессионный анализ. При использовании пошаговых процедур коррелированность переменных не так критична: из пары сильно взаимосвязанных признаков алгоритм включает только один показатель (Реброва, 2003). Полученные результаты, согласно индексу множественной детерминации  $R^2 = 0.86$ , характеризуют сильную обусловленность содержания углерода предикторами. Величина полного  $F$ -критерия для регрессионного уравнения (185.67) превосходит критическое значение (3.85), т. е. связь углерода и физико-химических показателей статистически значима. Среднеквадратичная ошибка регрессионного уравнения составляет 1.95.

На первом шаге включается тот предиктор, который имеет наиболее высокий частный коэффициент корреляции с откликом. Как следует из табл. 3, такой переменной является зольность. После введения параметров плотности и степени разложения прирост величины множественных  $R^2$  незначителен, а величины частных  $F$ -критериев меньше критических значений. Отсюда следует, что добавление в регрессионную модель этих переменных очень мало снижает необъясненную вариацию отклика.

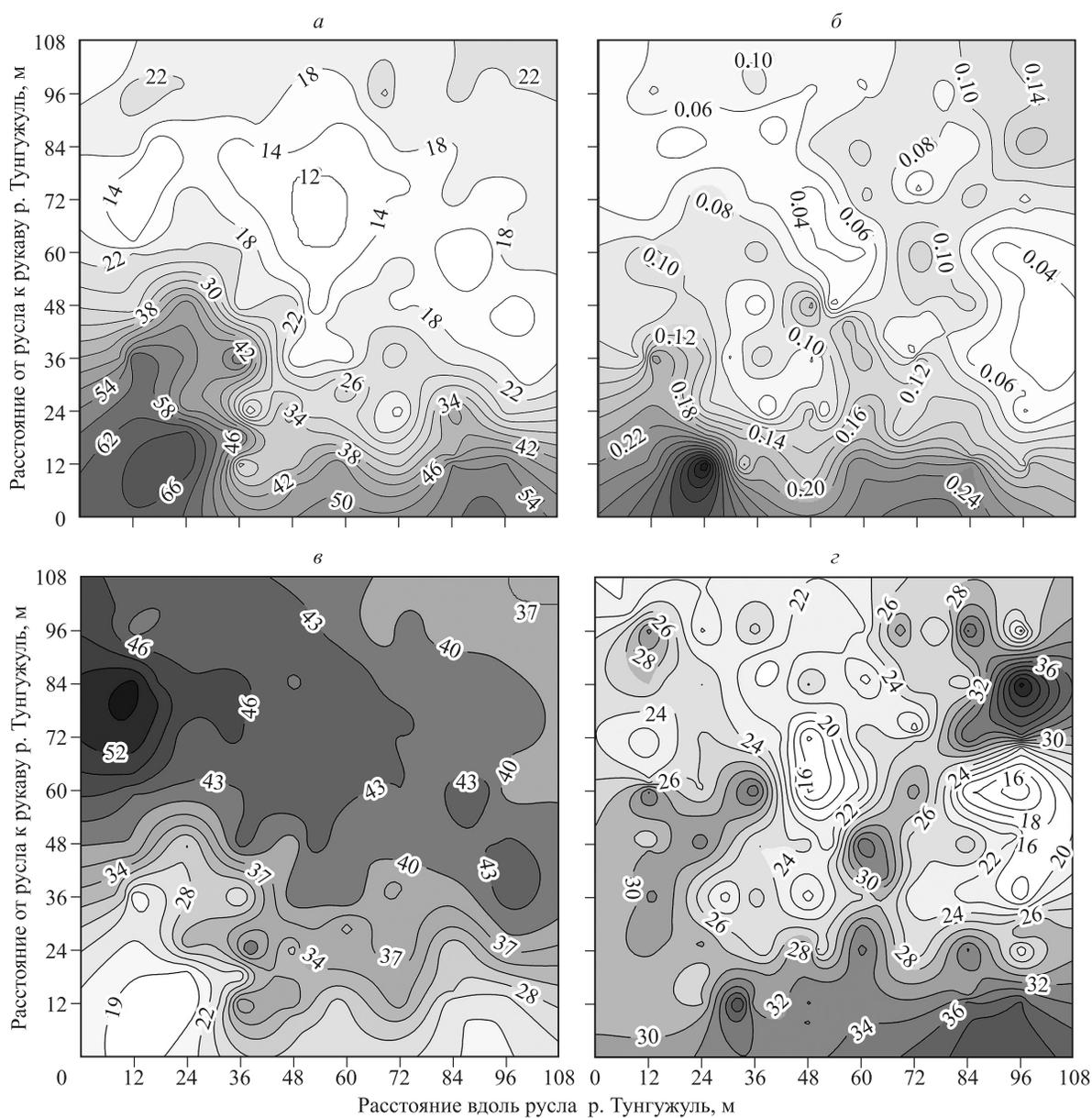
На этом основании принимается решение о сохранении единственной предикторной переменной – зольности торфяного субстрата.

*Парный регрессионный анализ.* В торфяных почвах отрицательная связь содержания углерода с зольностью иллюстрируется диаграммой разброса точек вокруг линии регрессии (рис. 4, а).

**Таблица 2.** Статистическая характеристика содержания органического углерода и физико-химических показателей торфяной почвы (0–20 см) межгорных котловин Кузнецкого Алатау под ельником зеленомошно-гипновым

Переменные	Статистические показатели					
	$\bar{x}$	$s\bar{x}$	<i>Med</i>	Min	Max	<i>CV</i>
Углерод, %	41.18	0.603	41.89	26.71	55.93	14
Зольность, %	25.05	1.53	19.42	5.03	68.60	63
Степень разложения, %	23.15	0.52	23.59	11.78	35.21	22
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0.097	0.005	0.086	0.019	0.245	56

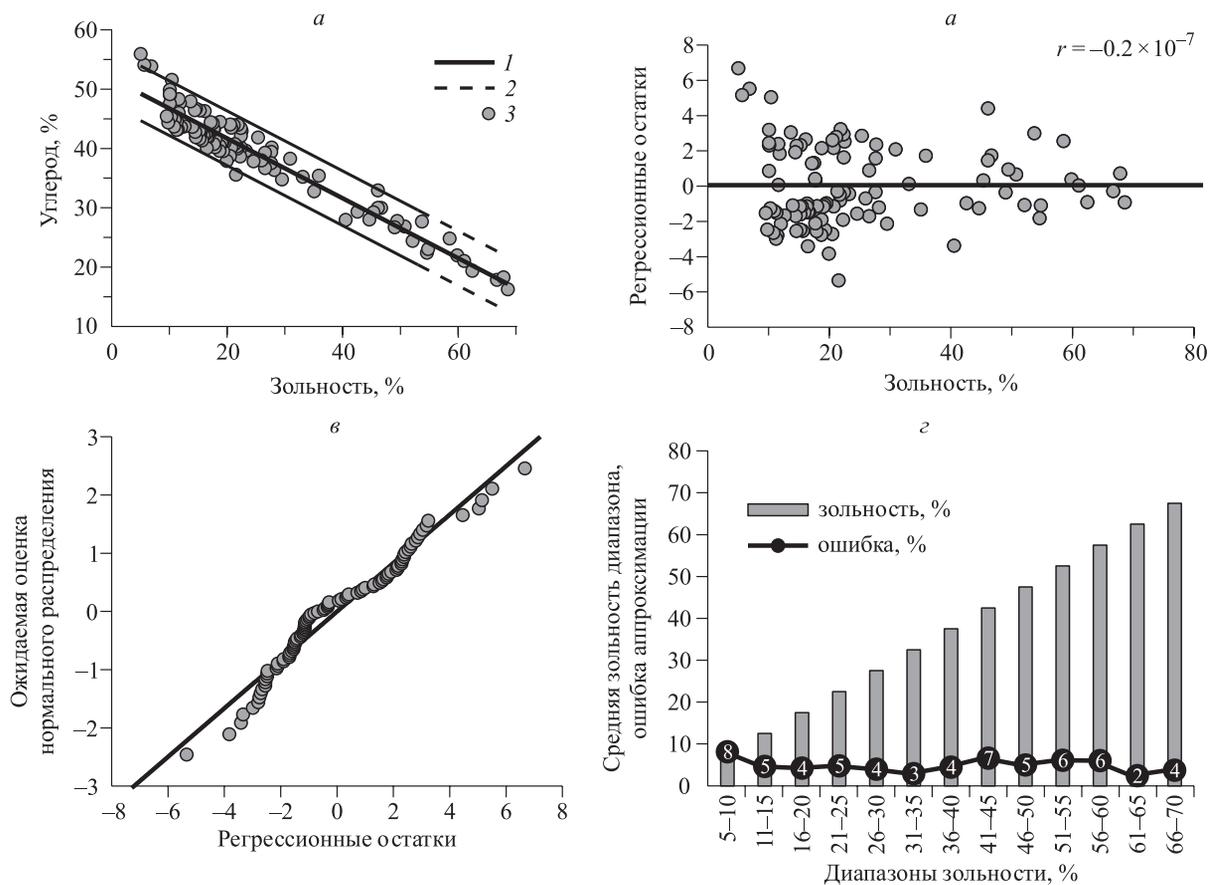
*Примечание.*  $\bar{x}$  – среднее;  $s\bar{x}$  – ошибка среднего; *Med* – медиана; *CV* – коэффициент вариации, %.



**Рис. 3.** Пространственная вариабельность физико-химических свойств и содержания углерода в современной торфяной почве междруслового пространства: *а* – зольность, %; *б* – плотность, г/см<sup>3</sup>; *в* – углерод, %; *г* – степень разложения, %.

**Таблица 3.** Результаты пошагового регрессионного анализа связи органического углерода и физико-химических показателей торфяной почвы

Предиктор	Множественный индекс детерминации $R^2$	Частный индекс детерминации $R^2$	Частный $F$ -критерий	$p$ -уровень
Зольность	0.862	0.862	542.28	< 0.001
Плотность	0.864	0.002	1.20	0.277
Степень разложения	0.868	0.004	2.54	0.115



**Рис. 4.** Парная регрессионная связь органического углерода торфяной почвы с зольностью (а) и оценка качества модели: б – зависимость остатков от предикторной переменной; в – диаграмма нормального распределения остатков; г – относительная ошибка аппроксимации. Условные обозначения: 1 – теоретическая линия регрессии, 2 – зона прогноза по регрессии, 3 – аналитические данные.

**Таблица 4.** Парная регрессионная связь содержания органического углерода и зольности современной торфяной почвы 0–20 (30) см болотного ельника

Коэффициент	Оценка статистических параметров			
	Значение	p-уровень	Границы 95 % доверительного интервала	
			нижняя	верхняя

Оценка качества регрессионной модели:

$$R^2 = 0.93, F\text{-критерий} = 1300, p\text{-уровень} < 0.001, s^* = 2.26$$

Константа	51.78	< 0.001	50.96	52.60
Регрессионный коэффициент	-0.504	< 0.001	-0.532	-0.476

Примечание. \* – среднеквадратичная ошибка оценки.

Статистически значимый коэффициент детерминации ( $R^2$ ), величина которого служит индикатором степени подгонки модели, говорит о том, что 93 % изменчивости содержания углерода объясняется зольностью (табл. 4).

Свободный член и коэффициент регрессии уравнения связи значимы на уровне  $< 0.001$ . Среднеквадратичная ошибка оценки (2.26), измеряемая в единицах зависимой переменной,

характеризует отклонение эмпирических данных от линии регрессии и показывает, какая в среднем допускается ошибка, если пользоваться уравнением для прогнозирования. Оставшаяся доля вариабельности углерода (7 %) может объясняться неучтенными факторами.

*Анализ остатков.* Чтобы проверить адекватность построенной модели, т. е. установить, соответствует ли модель натурным данным и

выполняются ли условия применения используемого метода наименьших квадратов, прибегли к процедуре анализа остатков (разностей между экспериментальными данными и значениями, рассчитанными по регрессионному уравнению). В случае правильно подобранной модели вычисленные остатки характеризуются однородностью дисперсий (гомоскедастичностью), являются независимыми от предиктора, имеют нормальное распределение и характеризуются отсутствием автокорреляции.

Построим диаграмму разброса остатков относительно независимой переменной. Остатки примерно одинаково часто принимают как положительные, так и отрицательные значения, не проявляют тенденции к росту с увеличением зольности и не обнаруживают выраженной зависимости от данного показателя:  $r = -0.2 \times 10^{-7}$  (рис. 4, б), т. е. остатки гомоскедастичны. О корректности применения регрессионного анализа свидетельствует также приближенное к нормальному закону распределение остатков: точки диаграммы располагаются почти на одной линии, без экстремальных значений (рис. 4, в).

Следующим шагом в анализе остатков является проверка предположения об отсутствии автокорреляции между соседними остатками, которая проверяется с помощью статистики Дарбина–Уотсона ( $DW$ ). Применение данного критерия основано на сравнении величины  $DW$  с критическими теоретическими значениями  $d_L$  и  $d_U$  для заданного количества наблюдений, числа независимых переменных в модели и уровня значимости  $\alpha$  (Дрейпер, Смит, 1986). Остатки при выборе прямой связи органического углерода и зольности по  $n = 100$  привели к значению  $DW$ , равному 1.85 при  $r = 0.073$ . Для выборки такого размера и одного предиктора табличные значения критерия Дарбина–Уотсона при уровне вероятности 5 % составляют  $d_L = 1.65$ ,  $d_U = 1.69$ , т. е.  $DW > d_U$ . Это дает основание говорить об отсутствии автокорреляции остатков и утверждать, что условие применимости метода наименьших квадратов не нарушается.

Величину, характеризующую качество построенной модели и точность прогноза, рассчитывали по формуле 1 (Елисеева и др., 2003):

$$A = \left| \frac{y - y_p}{y} \right| \times 100 \%, \quad (1)$$

где  $A$  – относительная ошибка аппроксимации, %;  $y$  – аналитические данные углерода;  $y_p$  – рас-

четные значения углерода,  $|y - y_p|$  – величины, соответствующие модулю.

Ошибка аппроксимации построенной модели составляет менее 5 % или находится в интервале 5–8 % (рис. 4, з), что характеризует высокую и хорошую точность прогноза, согласно оценкам И. И. Елисеевой с соавторами (2003).

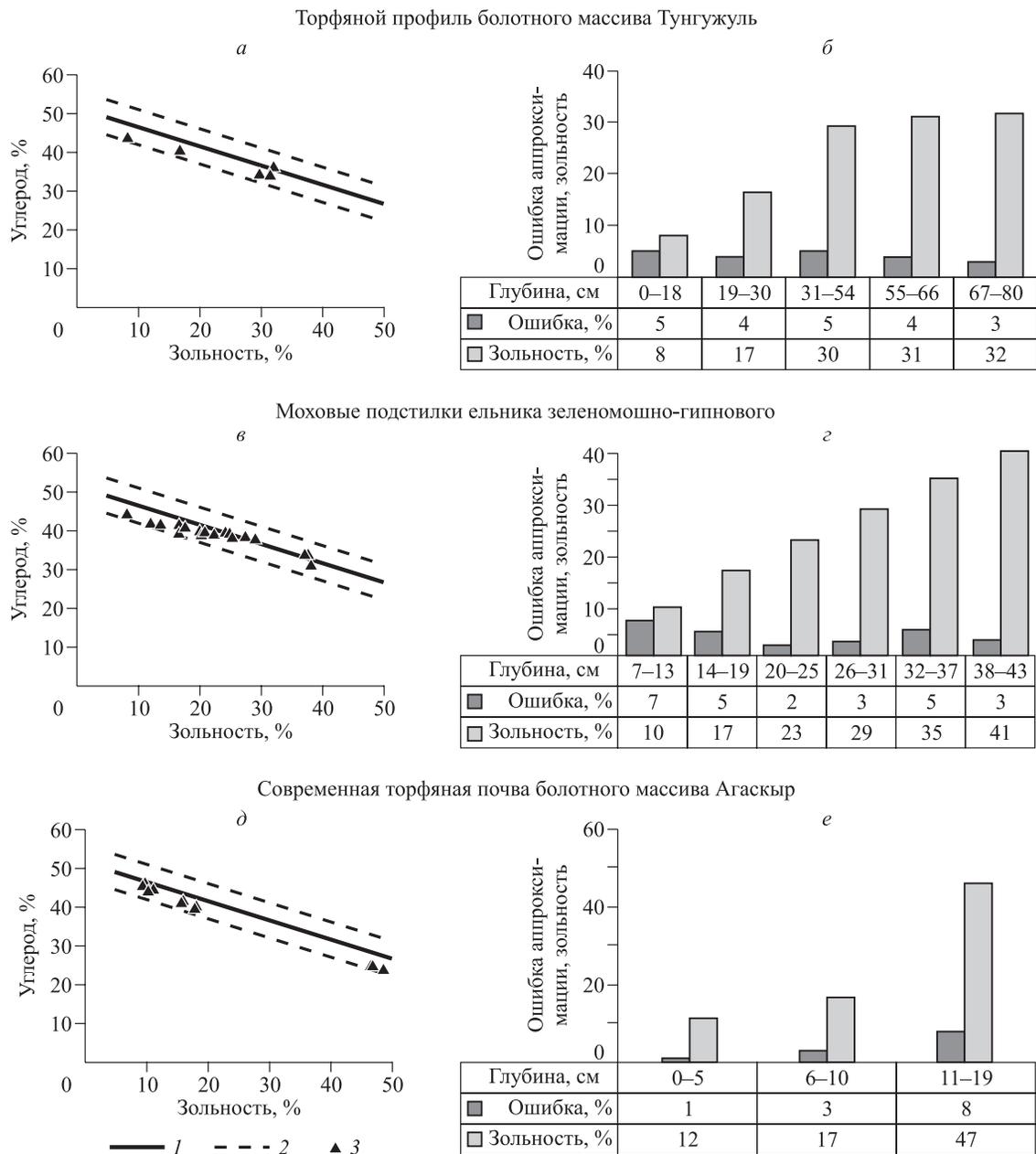
*Верификация модели.* Для проверки работоспособности регрессионной модели связи органического углерода и зольности торфяной почвы использовали аналитические данные по трем объектам, которые не участвовали в моделировании. Это оттаявший профиль южной экспозиции берегового вала р. Тунгужуль, моховые подстилки за пределами ПП и болотный массив вблизи оз. Агаскыр (долина р. Печище, бассейн р. Черный Июс) в 130 км от основного объекта исследования.

Аналитические данные контрольных объектов полностью вписываются в пределы доверительных интервалов регрессионного уравнения (рис. 5, а, в, д), а ошибки аппроксимации в абсолютном большинстве случаев находятся в интервале высокой и хорошей точности прогноза (рис. 5, б, з, е).

Среднее квадратичное отклонение разностей между эмпирическим и расчетным содержанием углерода в контрольных объектах сопоставимо с его теоретическим значением (2.26 %), составляя для стратиграфического профиля болота Тунгужуль 2.72, моховых подстилок – 1.73, торфяной почвы массива Агаскыр – 1.65 %. Полученные результаты свидетельствуют о надежности построенной модели и ее высоком качестве.

Таким образом, выполненная регрессионная модель может успешно использоваться для расчета содержания углерода по зольности в лесной подстилке, современных органогенно-аккумулятивных почвах, погребенных торфах и торфяно-минеральных образованиях в широком диапазоне прогностического признака 5–68 %.

*Прописи расчетного метода определения органического углерода по зольности растительного субстрата.* Воздушно-сухой образец измельчается и просеивается на почвенном сите с размером ячеек 0.5 мм. В предварительно прокаленный и взвешенный тигель на аналитических весах отвешивается 1–2 г торфа или моховой подстилки и одновременно в бюксы берется навеска 3–5 г на определение гигроскопической воды (Аринушкина, 1962). Тигли в открытом виде помещаются в холодную муфельную печь. После достижения температуры 900 °С сгора-



**Рис. 5.** Верификация регрессионной модели прогноза содержания органического углерода (*a, в, д*) и относительная ошибка аппроксимации (*б, г, е*). Условные обозначения: 1 – теоретическая линия регрессии, 2 – зона прогноза по регрессии, 3 – эмпирические данные углерода контрольных объектов.

ние проводится в течение 1.5 ч (как показывает наша многолетняя аналитическая практика, такое время достаточно для полного сгорания органики и не требует повторного, контрольного сжигания до постоянной массы).

Содержание золы вычисляется по формуле:

$$Z = \frac{a \times 100}{p} \cdot K, \quad (2)$$

где  $Z$  – зольность, %;  $a$  – масса золы, г;  $p$  – воздушно-сухая навеска, г;  $K$  – коэффициент пересчета воздушно-сухой навески на сухую.

Далее рассчитывается содержание углерода согласно регрессионному уравнению:

$$C = 51.78 - 0.504 \cdot Z, \quad (3)$$

где  $C$  – углерод, %;  $Z$  – зольность, %.

Предлагаем также воспользоваться табличными показателями, которые рассчитаны нами по регрессионной модели, приведенной выше (табл. 5).

Приведенные стандартные отклонения и 95%-е доверительные интервалы для прогнозируемых значений рассчитаны по соответствующим формулам (Дрейпер, Смит, 1986).

**Таблица 5.** Расчетные значения и точность оценки содержания углерода по зольности растительного субстрата

Z, %	C, %	S	Δ	Z, %	C, %	S	Δ
5	49.26	2.39	46.93–51.59	39	32.11	2.29	29.88–34.35
7	48.25	2.37	45.94–50.57	41	31.10	2.29	28.87–33.34
9	47.24	2.36	44.94–49.55	43	30.10	2.30	27.86–32.33
11	46.23	2.35	43.94–48.53	45	29.09	2.30	26.85–31.33
13	45.23	2.35	42.94–47.51	47	28.08	2.30	25.83–30.32
15	44.22	2.34	41.94–46.49	49	27.07	2.31	24.82–29.32
17	43.21	2.33	40.94–45.48	51	26.06	2.31	23.81–28.31
19	42.20	2.32	39.94–44.46	53	25.05	2.32	22.80–27.31
21	41.19	2.32	38.93–43.45	55	24.04	2.32	21.78–26.31
23	40.18	2.31	37.93–42.43	57	23.04	2.33	20.76–25.31
25	39.17	2.31	36.93–41.42	59	22.03	2.34	19.75–24.31
27	38.16	2.30	35.92–40.41	61	21.02	2.35	18.73–23.31
29	37.16	2.30	34.92–39.40	63	20.01	2.35	17.71–22.31
31	36.15	2.30	33.91–38.39	65	19.00	2.36	16.70–21.31
33	35.14	2.29	32.90–37.38	67	17.99	2.37	15.68–20.31
35	34.13	2.29	31.90–36.37	69	16.98	2.39	14.66–19.31
37	33.12	2.29	30.89–35.36				

Примечание. S – стандартное отклонение, Δ – 95%-й двусторонний доверительный интервал содержания углерода.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статистически доказана отрицательная связь содержания органического углерода и зольности растительного субстрата в диапазоне 5–68 %. По типу линейной функции построена адекватная регрессионная модель, с помощью которой можно выполнять надежные подсчеты пула органического углерода в лесной подстилке, современных органогенно-аккумулятивных почвах, погребенных торфах и торфяно-минеральных образованиях. Простой характер регрессионных моделей с включением только одного показателя – зольности субстрата (аналитически легко определяемого), делает расчетную формулу несложной и удобной в практическом применении. Регрессионные зависимости построены по наблюдениям, полученным в болотных зеленомошно-гипновых ельниках межгорных котловин Кузнецкого Алатау.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ариушикина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1962. 491 с.
- Вомперский С. Э., Цыганова О. П., Ковалев А. Г., Глухова Т. В., Валяева Н. А. Заболоченность территории России как фактор связывания атмосферного углерода // Круговорот углерода на территории России. М., 1999. С. 124–145.
- Дерффель К. Статистика в аналитической химии. М.: Мир, 1994. 258 с.
- Дрейнер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Кн. 1. Пер. с англ., 2-е изд., перераб. и доп. М.: Финансы и статистика, 1986. 366 с.
- Дюкарев Е. А., Головацкая Е. А. Моделирование углеродного баланса болотных экосистем южной тайги при различных сценариях изменения климата // Вычислительные технологии. 2008. Т. 3. Спец. вып. С. 130–136.
- Елисеева И. И., Курьшиева С. В., Костеева Т. В., Бабаева И. В., Михайлов Б. А. Эконометрика. М.: Финансы и статистика, 2003. 344 с.
- Ефремов С. П., Ефремова Т. Т., Мелентьева Н. В. Запасы углерода в экосистемах болот // Углерод в экосистемах лесов и болот России. Красноярск: Ин-т леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 1994. С. 128–139.
- Ефремова Т. Т., Аврова А. Ф., Ефремов С. П. Морфолого-генетические типы подстилок болотных ельников // Сиб. лесн. журн. 2015. № 1. С. 58–74.
- Инишева Л. И., Сергеева М. А., Смирнов О. Н. Депонирование и эмиссия углерода болотами Западной Сибири // Научный диалог. 2012. № 7. С. 61–74.
- Крештапова В. Н. Агрогеохимия торфяных почв Нечерноземной зоны европейской части РСФСР: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. М., 1991. 45 с.

- Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 1992. 157 с.
- Орлов Д. С., Бирюкова О. Н., Суханова Н. И. Органическое вещество почв Российской Федерации. М.: Наука, 1996. 265 с.
- Пономарева В. В., Николаева Т. А. Методы изучения органического вещества в торфяно-болотных почвах // Почвоведение. 1961. № 5. С. 88–95.
- Пьявченко Н. И. Торфяники Русской лесостепи. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 191 с.
- Пьявченко Н. И. Степень разложения торфа и методы ее определения. Красноярск, 1963. 55 с.
- Реброва О. Ю. Статистический анализ медицинских данных. Применение пакета прикладных программ STATISTICA. М.: Медиа Сфера, 2003. 312 с.
- Сердюцкая Л. Ф. Системный анализ и математическое моделирование экологических процессов в водных экосистемах. М.: Кн. дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 144 с.
- Belyea L. R., Malmer N. Carbon sequestration in peatland: patterns and mechanisms of response to climate change // *Global Change Biol.* 2004. V. 10. P. 1043–1052.
- Tolonen K., Turunen J. Accumulation rates of carbon in mires in Finland and implications for climate change // *The Holocene.* 1996. V. 6 (2). P. 171–178.
- Vasander H., Kettunen A. Carbon in boreal peat lands // *Boreal Peat Land Ecosystems.* Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006. P. 165–194.

## CALCULATION METHOD FOR DETERMINATION OF CARBON IN THE PEAT AND MOSS LITTER OF FOREST SWAMPS BY ASH CONTENT OF PLANT SUBSTRATES

T. T. Efremova, A. F. Avrova, S. P. Efremov

*Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch – Solitary Unit V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation*

E-mail: efr2@ksc.krasn.ru, avrova@ksc.krasn.ru, efr2@ksc.krasn.ru

Studies were carried out in the low mountain part of the Kuznetsk Alatau. The spruce stands were studied in the peaty valley of river Tunguzhul and swamp near Agaskyr Lake (valley of river Pechische, basin of river Black Iyus). The objects belong to the group of high ash content flood plain peat lands of cryogenic series. We have done the evaluation of organic carbon response to physical-chemical properties – decomposition degree, ash content, and bulk density, connected together ( $r = 0.5–0.7$ ), that in contrast to carbon, is easily determined analytically. Received results according to stepwise regression analysis characterize the strong conditionality predictors of carbon: multiple determination index  $R^2 = 0.86$ . The highest partial correlation coefficient with the response belongs to the ash content in range (5–68 %). Partial correlation coefficient values of bulk density and decomposition degree is not significant. The determination index ( $R^2 = 0.93$ ), constant and negative coefficient of pair regression analysis are highly significant and evidence of the strong bond of carbon and organic substrate ash content. The relative error of approximation is in the range of 2–8 % and characterizes the high accuracy of prognosis. Including only one indicator (ash content) in the calculation formula makes it convenient and simple in practical application for the carbon content prediction on the forest litter, modern peat soils, buried peat and peat-mineral formations with ash content of 5–68 %. We are the first to present the geochemical characteristics of forest swamps peat mine for the Kuznetsk Alatau intermountain basins.

**Keywords:** *organic carbon, physical-chemical indices, multiple and pair regression analysis, bog spruce forests, peat mine, Kuznetsk Alatau.*

**How to cite:** *Efremova T. T., Avrova A. F., Efremov S. P. Calculation method for determination of carbon in the peat and moss litter of forest swamps by ash content of plant substrates // Sibirskij Lesnoj Zhurnal (Siberian Journal of Forest Science). 2016. N. 6: 73–83 (in Russian with English abstract).*