

Барсуков П.А., Ызаканов Т.Ж.

ТОПУРАКТАГЫ ОРГАНИКАЛЫК КӨМҮРТЕКТИ ЖОГОТУУСУН  
ЭСЕПТӨӨ БАТЫШ СИБИРДИН ТОКОЙ ТАЛААЛАРЫНЫН МИСАЛЫНДА

Барсуков П.А., Ызаканов Т.Ж.

РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА ИЗ ПОЧВ  
НА ПРИМЕРЕ ЛЕСОСТЕПИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

P. Barsukov, T. Yzakanov

CALCULATION OF ORGANIC CARBON LOSSES FROM SOILS ON THE  
EXEMPLE OF THE FOREST-STEPPE OF WESTERN SIBERIA

УДК: 631.417

Айыл чарба жерлеринин топурактарынан органикалык көмүртектин биринчи эсептелген жоготуулары келтирилген, анын ичинде. 20-кылымдын ичинде Россиядагы Батыш Сибирдин токойлуу-талаа зонасынын айдоо аянттарынан, чабындыларынан, жайыттарынан. Бул изилдөөлөр жер кыртышында көмүртектин топтолушу (секвестрлөө) жана айыл чарба жерлеринен атмосферага парник газдарынын эмиссиясын азайтуу аркылуу климаттын глобалдык өзгөрүшүнүн кесепеттерин жумшартуу боюнча адаптациялоо чараларын иштеп чыгууда маанилүү роль ойнойт, жана тескерисинче: туруктуу эмес топурак башкаруу же айыл чарба тажрыйбалары топурактын көмүртектерин атмосферага көмүр кычкыл газы (CO<sub>2</sub>) түрүндө бөлүп чыгарышы мүмкүн, бул өз кезегинде климаттын өзгөрүшүнүн терс кыймылдаткычы болушу мүмкүн. Ал теориялык жана практикалык мааниге ээ, органикалык көмүртекти эсептөөдө методологиялык жана методологиялык ыкмалар колдонулган.

**Негизги сөздөр:** эсептөө, жоготуу, көмүртек, көмүр кычкыл газы, топурак, айдоо жерлер, чабындылар, жайыттар, адаптация, өзгөрүү, климат.

Приводятся впервые рассчитанные потери органического углерода из почв сельскохозяйственных угодий, в т.ч. из пашни, сенокосов, пастбищ лесостепной зоны Западной Сибири России в течении XX века. Эти исследования будут играть важную роль в разработке адаптационных мероприятий смягчения последствий глобального изменения климата за счет накопления (связывания) углерода почвой и уменьшения выбросов парниковых газов в атмосферу из земель сельскохозяйственного назначения, и наоборот: нерациональные методы использования или сельскохозяйственной обработки почв могут провоцировать выбросы почвенного углерода в атмосферу в виде диоксида углерода (CO<sub>2</sub>), что, в свою очередь, может стать отрицательным фактором изменения климата. Имеет теоретическое и практическое значение, используемые методические и методологические подходы расчета органического углерода.

**Ключевые слова:** расчет, потеря, углерод, углекислый газ, почва, пашня, сенокос, пастбище, адаптация, изменение, климат.

The first calculated losses of organic carbon from soils of agricultural lands are given, incl. from arable land, hayfields, pastures of the forest-steppe zone of Western Siberia in Russia during the 20th century. These studies will play an important role in the development of adaptation measures to mitigate the effects of global climate change through the accumulation (sequestration) of carbon in the soil and the reduction of greenhouse gas emissions into the atmosphere from agricultural land, and vice versa: unsustainable soil management or agricultural practices can release soil carbon into the atmosphere in the form of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), which in turn can be a negative driver of climate change. It is of theoretical and practical importance, used methodological and methodological

approaches to the calculation of organic carbon.

**Key words:** calculation, loss, carbon, carbon dioxide, soil, arable land, hayfields, pastures, adaptation, change, climate

На основании сравнительного анализа содержания органического углерода в почвах в 1894 г. (в естественных экосистемах) и в 1998-2021 гг. (в различных сельскохозяйственных экосистемах) были рассчитаны размеры потерь органического углерода из почв сельскохозяйственных угодий лесостепной зоны Западной Сибири в течение XX века. Было получено, что из пахотных земель потери углерода составили  $10 \cdot 10^8$  т; с земель, занятых сенокосами –  $2 \cdot 10^8$  т, а пастбищами –  $1,4 \cdot 10^8$  т. Величины потерь органического углерода из почв под сенокосами и пастбищами получены впервые для Сибири. Рассчитанные нами в среднем за год значения скорости потерь органического углерода из пахотных почв лесостепной зоны Западной Сибири за полувековой период оказались на 55% выше ранее приведенных оценок: 180 г С/м<sup>2</sup> против 116 г С/м<sup>2</sup>. Также приводятся примеры основных методических и методологических ошибок, которые нужно заранее учитывать при планировании подобных исследований для получения надежных результатов, легко сравнимых с данными других авторов и высокой степени публикабельности этих результатов в высокорейтинговых международных научных журналах.

Почвенное органическое вещество является крупнейшим резервуаром углерода, находящимся в быстром обмене с атмосферным углекислым газом и, таким образом, является потенциальным источником и поглотителем парниковых газов в масштабах времени, представляющих интерес для человечества [21]. В настоящее время, общепризнанные глобальные оценки содержания углерода в верхнем метровом слое почвы находятся в диапазоне 1300-1600 Пг углерода (без учета углерода в вечной мерзлоте и болотных экосистемах) [16]. В почвах Сибири, территория которой занимает 7.3% от мировой, содержится около 13% мирового запаса углерода [12].

Трансформация естественных экосистем в агро-экосистемы вызывает значительное усиление минерализации почвенного органического вещества, что приводит к дополнительному поступлению углекислого газа в атмосферу. В лесостепной зоне Западной

Сибири в течение XX столетия произошло резкое (более чем в 5 раз) увеличение площади сельскохозяйственных угодий, которые в настоящее время практически достигли своих максимальных значений. Известно, что перевод естественных экосистем в сельскохозяйственные сопровождается драматическим снижением содержания почвенного органического вещества (ПОВ). Почвенное органическое вещество, часть которого представлена гумусом, является одним из наиболее важных показателей плодородия почвы, поскольку от его содержания зависят многие физические и физико-химические свойства почвы, а также содержание двух наиболее дефицитных элементов минерального питания растений - азота и фосфора. Поэтому мониторинг содержания ПОВ в почве является крайне важным с точки зрения прогноза продуктивности культур. Помимо этого, в последнее десятилетие особую остроту приобрел вопрос экспоненциального роста концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере (ассоциированного в том числе со снижением содержания в почве органического углерода) и, соответственно, его влиянием на глобальное изменение климата. Определение размеров потерь органического углерода за длительный период времени и с достаточно большой площади имеет ряд трудностей, среди которых наибольшее значение имеет недостаток либо полное отсутствие исходных данных о содержании ПОВ в ранние периоды наблюдения. Однако точность определения потерь углерода ПОВ крайне важна, так как на таких оценках базируется прогноз будущих изменений свойств почвы и размеров эмиссии  $\text{CO}_2$  из почвы.

**Материалы и методы.** Проведенная в 1894 г. экспедиция московских почвоведов И.П. Выдрина и З.И. Ростовского по Алтайскому округу (куда в настоящее время входят Алтайский край, большая часть Новосибирской, часть Томской и Кемеровской областей) предоставила нам уникальную возможность оценить изменение содержания ПОВ более чем за сто лет. Во время экспедиции 1894 г. было сделано описание более 1000 почвенных профилей, в т.ч. примерно в трети образцов проведено определение содержания гумуса (по методу Густавсона) в верхнем 0-20 см слое почвы. В пояснительной записке к карте сделано краткое описание мест отбора почвенных образцов с указанием типа землепользования (целина, залежь или пашня) и гранулометрического состава почв [2].

В июле-августе 1998 г. нами был осуществлен поиск тех точек отбора образцов, которые были расположены в лесостепной зоне и которые в 1894 г. находились под естественной луговой, лугово-степной растительностью. Всего были отобраны почвенные образцы в 65 точках/местах, из которых в настоящее время 41 расположено на пахотных землях, 9 – на сенокосах, 7 – на пастбищах и 4 – на целинных землях.

С каждой точки были отобраны смешанные образцы в  $3^x$  кратной полевой повторности из пахотного слоя или верхней части гумусово-аккумулятивного горизонта почв. Полевые повторности представляют собой обособленные в пространстве части поля, удаленные друг от друга на расстояние около 70 м. Каждый смешанный образец, составляли из 40 индивидуальных образцов. Также с каждой точки были отобраны образцы ненарушенного сложения для определения объемного веса почвы. По этой же методике в начале августа 2021 г. был проведен дополнительный поиск и отбор почвенных образцов еще из 23 точек, из которых в настоящее время 16 расположено на пахотных землях, 3 – на сенокосах, 2 – на пастбищах и 2 – на целинных землях. Анализ почвенных образцов на содержание углерода ПОВ проводили по методу Тюрина [14]. Статистическую обработку данных проводили методами описательной статистики и дисперсионного анализа с помощью пакета программ прикладной статистики Snedecor v.5.80 [10].

**Результаты исследований.** Результаты определения гумуса по методу Густавсона в почвенных образцах 1894 г. были пересчитаны в данные по методу Тюрина, используя коэффициент 1,05 [14]. Учитывая объемный вес почвы, были рассчитаны запасы органического углерода в 1894 и 1998 и 2021 гг. Объемный вес почвы в 1894 г. рассчитывали с учетом коэффициента 1.055 в соответствии с данным, приведенными в статье А.А. Титляновой с соавт. [11] в среднем для всех типов почв. Приняли, что запас органического углерода в слое 0-30 см в 1.3 раза больше чем в слое 0-20 см для всех почв. Этот коэффициент 1.3 рассчитан по линии регрессии усредненного профиля содержания углерода в черноземных почвах [11].

Известно, что после смены землепользования стабилизация содержания углерода ПОВ ( $\text{C}_{\text{орг}}$ ) на новом уровне происходит за 40-100 лет, а для большинства почв – преимущественно в течение 50 лет, причем снижение содержания  $\text{C}_{\text{орг}}$  имеет экспоненциальный характер [31,32,4], т.е. наибольшие изменения происходят в первые годы. Например, в регионах с умеренным климатом после начала культивации (механической обработки почвы) ранее не обрабатываемых луговых экосистем уменьшение запасов почвенного углерода в течение первых 5 лет произошло на 25-30% [19], а в течение 27 лет – на 57-61% [24]. В наших исследованиях, почвенные образцы были отобраны в 1998 г., т.е. через 104 года после почвенной экспедиции И.П. Выдрина и З.И. Ростовского, и не менее, чем через 40 лет после масштабной кампании по распашке целинных земель в Сибири и Северном Казахстане. Соответственно, отбор почвенных образцов в 2021 г. был проведен не менее чем через 60 лет после начала этой кампании. Это дает основание предположить, что ко времени даже первого отбора образцов в 1998

## ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ КЫРГЫЗСТАНА, № 6, 2022

г. основные изменения в содержании  $S_{ОРГ}$  уже произошли и его содержание стабилизировалось на новом уровне. Анализ  $S_{ОРГ}$  и расчет размеров его потерь при сравнение этих двух сроков отбора подтверждает это предположение. Поэтому в настоящей статье мы приводим результаты по содержанию  $S_{ОРГ}$  за первый срок отбора.

На основе убыли пула органического углерода в слое 0-20 см в 65 точках были найдены средние потери этого пула для почв разного вида сельскохозяйственного использования. Полученные данные были

обработаны  $2^x$  факторным дисперсионным анализом с неравным числом повторностей (табл. 1). За 104 года содержание органического углерода в почвах пахотных земель уменьшилось в среднем на 44%, а для сенокосов и пастбищ - на 32% и 23%, соответственно. Существенного изменения органического углерода в целинных почвах не обнаружено. Все полученные средние значения достоверно (на 1% уровне значимости) различаются в зависимости от вида сельскохозяйственного использования.

Таблица 1

Убыль (потери) углерода почвенного органического вещества в верхнем слое почвы ( $A_{\text{пах}}$ ) за 104 года в лесостепной зоне Западной Сибири, % от исходного содержания.

Фактор А (вид использования)	Фактор В (полевая повторность)			Средние фактора А	НСР (1%)	НСР (5%)
	1	2	3			
1 (пашня)	44,2	44,7	43,9	44,2 d	-	-
2 (сенокосы)	30,7	32,3	32,0	31,7 c	6,14	4,65
3 (пастбища)	21,0	25,4	22,3	22,9 b	6,82	5,17
4 (целина)	1,5	0,3	6,8	2,8 a	8,74	6,62
Средние фактора В	36,7 a	37,7 a	37,2 a			

**Примечание:** Средняя ошибка опыта = 2,973 (7,99% от общего среднего). Средние по факторам значения измеряемого параметра с разными буквами достоверно различаются ( $P < 0,01$ ).

Вероятность ошибки для фактора А (вида землепользования) равна нулю, а для фактора В (полевой повторности) – 94%. Степени влияния факторов А и В были равны 62% и 0%, соответственно. Отметим также, что коэффициенты вариации содержания ПОВ по полевым повторностям были небольшими и в среднем составили 6,9%.

**Обсуждение.** В конце 90-х годов прошлого века А.А. Титляновой с соавт. [11,12,13] была предпринята попытка оценить размеры потерь органического углерода из пахотных почв Западной Сибири. Авторами была составлена база данных «Органический углерод», в которую вошли результаты определения гумуса из 710 разрезов со временем отбора образцов с 1912 по 1992 гг. На основе этих данных были рассчитаны потери углерода из пахотных почв по простой формуле: [содержание  $S_{ОРГ}$  в 1912-1930 гг.] минус [содержание  $S_{ОРГ}$  в 1980-1992 гг.]. Было использовано допущение, что запас  $S_{ОРГ}$  до 1930 г. не изменялся по сравнению с целинными почвами. Основной недостаток данного подхода обусловлен большой пространственной неоднородностью распределения запасов  $S_{ОРГ}$  даже внутри одной почвенной разности. Так, например, при анализе содержания  $S_{ОРГ}$  в почвах Новосибирской области (наиболее изученной территории в Западной Сибири) в 1965-1971 и 1990-1995 гг., величина потерь  $S_{ОРГ}$  оказалась статистически недостоверной, а в ряде случаев наблюдалось даже увеличение содержания  $S_{ОРГ}$ .

Особенность примененного нами подхода к оценке размеров потерь органического углерода при антропогенной трансформации почв лесостепной

зоны Западной Сибири заключается в том, что мы взяли за основу современное (1980-1995 гг.) содержание  $S_{ОРГ}$  в почвах исследуемой территории (из базы данных «Органический углерод») и определенные нами относительные потери  $S_{ОРГ}$  из этих почв за период более ста лет (с 1894 г. по 1998-2021 гг.). Для расчетов нами были выделены следующие группы почвенных разностей: 1<sup>ая</sup> группа почв – светло-серые лесные, серые лесные, серые лесные осолоделые, серые лесные глеевые и темно-серые лесные почвы; 2<sup>ая</sup> группа почв – черноземы оподзоленные, выщелоченные, типичные, обыкновенные, обыкновенные карбонатные, обыкновенные осолоделые и обыкновенные солонцеватые; 3<sup>ая</sup> группа почв – лугово-черноземные, лугово-черноземные засоленные, черноземно-луговые, черноземно-луговые засоленные и луговые почвы; 4<sup>ая</sup> группа почв – солончаки и солонцы; 5<sup>ая</sup> группа почв – лугово-болотные, солоды и аллювиальные почвы. Используемые нами величины запаса  $S_{ОРГ}$  в почвах лесостепной зоны Западной Сибири в условно современное время для первых 4 групп были получены как средние по двум опубликованным источникам, базирующихся на большом массиве данных [11,12]. Пересчет запаса  $S_{ОРГ}$  в слое 0-50 см в запас в слое 0-30 см рассчитанного с помощью коэффициента 1,32, полученного по данным А.А. Титляновой с соавт. [11] и Г.П. Гамзикова [4].

Используя картографический и статистический материал, была определена общая площадь почв лесостепной зоны Западной Сибири, которая составила 27640 тыс. га. Расчет соотношения площадей, занимаемых пашней, сенокосами и пастбищами в % от

## ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ КЫРГЫЗСТАНА, № 6, 2022

общей площади по пяти группам почв произведены нами на основе этих соотношений в двух административных областях Западной Сибири: Новосибирской и Омской. Выбор этих областей связан с тем, что большая часть их сельскохозяйственных угодий расположена в лесостепной зоне, в отличие от других административно-территориальных единиц Западной Сибири. Относительные размеры площади пашни и кормовых угодий из общей площади составили 40,3% и 31,1%, соответственно. В свою очередь, получено, что 48,7% площади кормовых угодий в лесостепной зоне занято сенокосами и 51,3% - пастбищами.

На основе вышеприведенных данных были рассчитаны потери органического углерода из почв различного вида сельскохозяйственных угодий Западной Сибири за XX век (табл. 2). Учитывая отсутствие данных по запасу  $S_{ОРГ}$  для 5<sup>ой</sup> группы почв, а также небольшой вклад этой группы почв в площадь пахотных земель и кормовых угодий (1-9%) нами было использовано такое же среднее содержание  $S_{ОРГ}$  в слое 0-30 см для этой группы, как и для 3<sup>ей</sup> группы.

Расчеты были выполнены по следующим формулам:

$$Z_{a,h,p} = S_{ОРГ} \cdot S_{a,h,p} \cdot K_{a,h,p} / 10 / R_{sum},$$

где  $a,h,p,sum$  – нижние индексы для разных видов сельскохозяйственных угодий: пашня, сенокосы, пастбища и в сумме, соответственно;

$Z_{a,h,p,sum}$  – запас  $S_{ОРГ}$  для разных видов сельскохозяйственных угодий,  $10^6$  т;

$S_{ОРГ}$  – среднее по видам сельскохозяйственных

угодий содержание  $S_{ОРГ}$ , т/га;

$S_{a,h,p,sum}$  – площадь, тыс. га;

$K_{a,h,p}$  – коэффициент учета содержания  $S_{ОРГ}$  в зависимости от вида с/х угодий;

$R_{a,h,p,sum}$  – комплексный коэффициент учета влияния площади разного вида с/х угодий и содержания  $S_{ОРГ}$  на запас  $S_{ОРГ}$ ;

$L\%$  – потери  $S_{ОРГ}$  из слоя почвы 0-30 см, % (из табл. 1);

$L_T$  – потери  $S_{ОРГ}$  из слоя почвы 0-30 см,  $n \cdot 10^6$  т.

Коэффициенты  $K_a$ ,  $K_h$  и  $K_p$  рассчитывались, учитывая, что содержание  $S_{ОРГ}$ , оставшееся в почве через 100 лет составило 55,8%, 68,3% и 77,1%, соответственно.  $K_a = 0,72$  (77,1 / 55,8),  $K_h = 0,89$  (68,3 / 77,1) и  $K_p = 1,00$ .

$$R_{a,h,p} = (S_{a,h,p} \cdot 100 / S_{sum}) \cdot K_{a,h,p}$$

$$L_T = Z \cdot L\% / (100 - L\%)$$

Получено, что наибольшие потери органического углерода (в % от общих потерь внутри одного вида сельскохозяйственного использования) происходят в пахотных угодьях из черноземов (60%) и черноземно-луговых и лугово-черноземных почв (23%), а в кормовых угодьях – из солонцов и солончаков (43%) и черноземно-луговых и лугово-черноземных почв (35%) (табл. 2). Такое распределение величины потерь  $S_{ОРГ}$  по почвенным разностям обусловлено структурой фонда почв разного вида сельскохозяйственных угодий, запасами органического вещества в различных типах/подтипах почв и размерами потерь в зависимости от сельскохозяйственного использования.

Таблица 2

Потери органического углерода из почв (в слое 0-30 см) сельскохозяйственных угодий Западной Сибири

Показатель	Группа почв	Сельскохозяйственные угодья			
		пахотные	сенокосы	пастбища	всего/ среднее
Потери $S_{ОРГ}$ из слоя почвы 0-30 см, $n \cdot 10^6$ т ( $L_T$ )	1	93	10	7	110
	2	600	13	9	621
	3	229	69	47	346
	4	77	86	58	222
	5	5	21	14	40
	всего	1004	200	135	1339
Потери $S_{ОРГ}$ из слоя почвы 0-30 см, % от общих потерь внутри одного вида сельскохозяйственных угодий	1	9	5	5	8
	2	60	6	6	46
	3	23	35	35	26
	4	8	43	43	17
	5	1	11	11	3
Потери $S_{ОРГ}$ из почв, г/м <sup>2</sup>	1	7287	4270	2733	6207
	2	9585	5616	3594	9241
	3	9109	5337	3416	6657
	4	7367	4316	2762	4301
	5	9109	5337	3416	4656
	среднее	9004	4799	3071	6792
Потери $S_{ОРГ}$ из почв в среднем за 50 лет, г/м <sup>2</sup> за год	1	146	85	55	124
	2	192	112	72	185
	3	182	107	68	133
	4	147	86	55	86
	5	182	107	68	93
	среднее	180	96	61	136

Общие потери органического углерода ПОВ составили из пахотных земель  $10,04 \cdot 10^8$  т углерода, а из земель, занятых сенокосами и пастбищами –  $2,00 \cdot 10^8$  и  $1,35 \cdot 10^8$  т, соответственно. Суммарные потери органического углерода из почв лесостепной зоны Западной Сибири за XX век равняются  $13,4 \cdot 10^8$  т. Учитывая, что стабилизация содержания органического углерода в почве на новом уровне при сельскохозяйственном освоении целинных земель происходит в среднем за 50 лет, средняя скорость потерь углерода из почв лесостепи Западной Сибири изменяется от  $180 \text{ г/м}^2$  в год из пахотных земель до  $96 \text{ г/м}^2$  в год из почв сенокосов и  $61 \text{ г/м}^2$  в год из почв пастбищ (табл. 2). Рассчитанные нами величины скорости потерь  $S_{\text{орг}}$  для пахотных почв находятся в пределах потерь, сообщенных для различных пахотных почв в мире (от 53 до  $493 \text{ г/м}^2$  в год) и на 55% превышают приводимые ранее оценки для пахотных почв Западной Сибири [13]. По данным этих же авторов относительные размеры потерь углерода ПОВ (в % от его исходного содержания) в среднем для всех пахотных почв Западной Сибири были равны 29%, что также меньше полученных нами значений. Однако рассчитанные нами относительные величины потерь  $S_{\text{орг}}$  при агрогенной трансформации почв (44% для пашни, 32% для сенокосов и 23% для пастбищ) оказались весьма близки к глобальным оценкам потерь почвенного углерода: 40-48% для пашни [18,26] и 28% для сенокосов и пастбищ [18].

Отдельно остановимся на некоторых методических аспектах, которые необходимо учитывать при определении запасов и потерь  $S_{\text{орг}}$ . Это особенно важно при планировании публикации результатов своей работы в международных журналах и/или подачи заявок на международные гранты, получении международного финансирования, к чему, несомненно, необходимо стремиться. Коротко перечислим основные моменты, на которые нужно обратить внимание при планировании исследования запасов и потерь углерода ПОВ.

**(1) Методика отбора почвенных образцов.** В практике проведения исследовательских работ по этой тематике России методика отбора образцов часто «произвольная» – каждый исследователь может планировать отбор почвенных образцов в соответствии со своими представлениями. В западных странах протокол отбора образцов стандартизирован и описан в деталях с привязкой к различным площадям анализируемого участка и видам землепользования, с описанием методов расчета запаса и потерь  $S_{\text{орг}}$ , с рекомендуемыми методами математической статистики. В качестве примера можно привести Soil sampling protocol to certify the changes of organic carbon stock in mineral soil of European Union [33]. В частности, нужно обращать внимание на глубину отбора образцов.

Так, если в России определяют запас углерода в слое 0-20 см, и реже в слоях 0-50 и 0-100 см, то в западных странах часто анализируется слой почвы 0-30 см. Единая стандартизированная методика крайне важна для сравнения данных, полученных в различных экосистемах разными исследователями.

**(2) Пробоподготовка почвенных образцов.**

Классический способ определения ПОВ/гумуса по методу Тюрина подразумевает тщательный отбор не только крупных, но и мелких растительных остатков. Такой отбор растительного материала очень субъективен, и при его выполнении разными лаборантами можно легко получить разные результаты. В западных странах почвенный образец пропускают через сито с диаметром ячеек 2 мм и все прошедшие через это сито растительные остатки попадают в образец и анализируются вместе с почвой. Здесь также нужно обращать внимание на детали: условия сушки почвенного образца, пропускание через сито во влажном или сухом состоянии, тонкость помола образца и другое.

**(3) Метод анализа углерода ПОВ.**

Начиная с 30-ых годов прошлого века основным методом определения содержания  $S_{\text{орг}}$  в почвах был метод бихроматного окисления, называемый в России методом И.В. Тюрина [14] или метод Уокли и Блэка [37] в зарубежной практике [30]. В последние десятилетия широкое распространение получило определение содержания общего углерода в почве с помощью автоматических элементных анализаторов. В этих приборах происходит сжигание очень маленькой аликвоты почвенного образца в потоке кислорода при температуре 900-1200°C, с последующим количественным определением продукта полного окисления (двуокиси углерода) с помощью соответствующего детектора. Но есть важный методико-методологический момент, на который, в частности, указывает Н.Б. Наумова [6]: «Наряду с органическим, в твердой фазе почвы может присутствовать и неорганический углерод в виде карбонатов, бикарбонатов, угольных частиц, образовавшихся после пожаров. Неорганический углерод, как правило, составляет очень незначительную долю от общего, т.е. от суммы органического и неорганического углерода почвы, однако при расчете запасов углерода в почве им нельзя пренебрегать по ряду причин ..., в особенности в исследованиях, связанных с круговоротом углерода в разных экосистемах и/или с воздействием разных факторов». Автор приводит конкретные примеры опубликованных работ в русско- и англоязычной научной литературе с подменой понятий общего и органического углерода и справедливо делает вывод, что «неточное описание методов в плане использования терминов и/или отсутствие обоснования использования того или иного термина даже в ведущих профильных изданиях приводит, как минимум, к путанице ..., а, как максимум, ставит под

вопрос методологию и результаты таких исследований» [6].

**(4) Статистическая обработка полученных данных** является необходимым этапом в работах по оценке запаса и потерь углерода ПОВ, впрочем, как и во всех других почвенно-агрохимических исследованиях. В вышеупомянутом протоколе отбора почвенных образцов [33] в том числе зафиксированы и необходимые методы математической статистики. Для успешной публикации своих данных рекомендуем пользоваться общеизвестными для мировой научной общественности программными пакетами статистического анализа (например, Statistica, разработанный компанией StatSoft). Использование малоизвестных для широкой англоязычной аудитории статистических программ вызовет дополнительные вопросы у рецензентов и, соответственно, затруднит опубликование ваших результатов, а отсутствие статистического анализа данных (что, к сожалению, до сих пор встречается в русскоязычном сегменте научных журналов) сделает публикацию ваших исследований абсолютно невозможной даже в низкорейтинговых международных журналах.

**(5) Оценка качества почвенного органического вещества.** К настоящему времени убедительно доказано, что разработанный в 20-х годах прошлого века метод щелочного фракционирования (экстракции) ПОВ [36] не отражает реального качества ПОВ. Уже спустя десять лет после опубликования этой работы З.А. Ваксман осознал, что щелочные экстракты являются чисто операциональным, произвольным по химической сути конструктором, который «не может дать картины истинной природы гумуса, его происхождения и динамического состояния в почве». Тем не менее утверждения Ваксмана и других исследователей, а также их призывы к необходимости мульти- и даже междисциплинарного подхода к изучению органического вещества почвы [17] долгое время оставались не услышанными, и огромное число научных статей в России и за рубежом было посвящено анализу фракционного состава гумуса [9]. А.Л. Иванов с соавторами [5] в своем обзоре указывают: «Методами физического, химического и биологического фракционирования обнаружено несоответствие строения и свойств гуминовых веществ, выделяемых щелочной экстракцией, нативному почвенному органическому веществу. На базе супрамолекулярной химии, получившей развитие в конце XX века, стало возможным обосновать преобразование индивидуальных соединений, образующихся при разложении органических материалов, в псевдо-макромолекулярные объединения с характеристиками, приписываемыми гуминовым веществам. Были представлены альтернативные взгляды на состав и пути образования гуминовых ве-

ществ, предложены новые мицеллярные, агрегационные и супрамолекулярные модели гуминовых веществ и органоминеральных комплексов». Однако лишь в 2019 году Российский журнал «Почвоведение» сформулировал в Правилах для авторов следующую просьбу/требование: «Редакция журнала Почвоведение просит избегать использования и обсуждения в статьях данных по фракционному составу гумуса, поскольку этот метод устарел и уже давно не используется в других странах». Начиная с этого года, эта просьба актуализируется ежегодно в Правилах для Авторов (2022). Более того, в современной литературе получает распространение такое радикальное суждение, что «...гумус, гумификация и гуминовые вещества должны быть совсем изъяты из употребления, потому что эти классические понятия вытекают из традиционных процедур фракционирования почвенного органического вещества по растворимости» [35], что, впрочем, совпадает с более поздними взглядами З.А. Ваксмана.

Некоторые аспекты структуры гумуса/ПОВ, которые в определенной степени влияют на функции органического вещества в почве, можно оценить простыми методами, например, с помощью стехиометрии, а именно через соотношение углерода и азота. Понятно, что для оценки химической структуры нужно рассчитывать соотношение элементов на молярной/атомной основе [8]. Так, молярное отношение углерода и азота в ПОВ (которое характеризует обогащенность почвенного органического вещества азотом) рассчитывают следующим образом:

$$C : N = C(\%)/12 : N(\%)/14 = C(\%)/N(\%) \cdot 1,17$$

Однако, как отмечают О.А. Савенков и Н.Б. Наумова [9], в русскоязычной научной литературе (причем в специализированных журналах) повсеместно встречаются примеры расчета соотношения элементов на основе их массовой доли в образце почвы или растительного материала. Приведем пример неправильного расчета соотношения C/N в почве с содержанием 1,10% углерода и 0,12% азота:  $1,10\% / 0,12\% = 9$ . Правильный расчет должен быть следующий:  $1,10\% / 12 : 0,12\% / 14 = 11$ . Это пример для элементов с относительно близкой молярной (атомной) массой, а при расчете соотношений C/P и N/P правильные значения соотношений элементов уже будут соответственно в 2,58 и 2,21 раз выше, что, несомненно, уже является критической ошибкой при интерпретации результатов [9].

Из простых, но очень перспективных методов оценки качества почвенного органического вещества необходимо отметить термогравиметрический метод, разработанный С. Siewert [27]. Сущность метода заключается в последовательном нагревании навески почвенного образца от 25 до 950°C с равномерным увеличением температуры 5°C/мин. и постоянным

взвешиванием навески каждые 4 секунды для определения убыли/потерь углерода ПОВ. В последние годы это метод интенсивно развивается и позволяет одновременно определять элементное содержание С и N в ПОВ, легкоразлагаемые и трудноразлагаемые фракции ПОВ, индексы качества ПОВ, оценивать влияние агротехнических, агрохимических и иных антропогенных воздействий на почвенное органическое вещество [28,29,22,23,34]. Широкое распространение этого метода сдерживается довольно высокой стоимостью термовесов (устройства термогравиметрического и дифференциального термического анализа, например, TGA/SDTA 851), производимых компанией Mettler-Toledo.

**Заключение.** Таким образом, проведенные нами исследования и расчеты, позволили определить размеры потерь органического углерода из почв сельскохозяйственных угодий лесостепной зоны Западной Сибири в течение XX века. Установлено, что из пахотных земель было потеряно  $10 \cdot 10^8$  т углерода, с земель, занятых сенокосами –  $2 \cdot 10^8$  т и пастбищами –  $1,4 \cdot 10^8$  т. Суммарные потери составили  $13,4 \cdot 10^8$  т органического углерода. Отметим, что нами впервые рассчитаны потери органического углерода из почв Сибири под сенокосами и пастбищами, а полученные значения для пахотных земель на 55% выше приводимых ранее оценок [12]. Приводятся примеры основных методических и методологических ошибок, которые нужно заранее учитывать при планировании подобных исследований для получения надежных результатов, легко сравнимых с данными других авторов и высокой степени публикательности этих результатов в высокорейтинговых международных научных журналах.

Исследования были выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект №121031700309-1).

#### Литература:

- Агрохимические методы исследования почв. Соколов А.В. (ред.). 5-е изд., доп. и перераб. Москва: Наука. 1975. 656 с.
- Выдрин И.П., Ростовский З.И. Материалы по исследованию почв Алтайского округа. Барнаул. 1899. 171 с.
- Гамзиков Г.П. Азот в земледелии Западной Сибири. Москва: Наука. 1981. 265 с.
- Гамзиков Г.П., Барсуков П.А., Вервайн О.Д. Изменение агрохимических свойств дерново-подзолистой почвы при длительном применении удобрений // Доклады РАСХН. 2007. № 5. С. 28-32.
- Иванов А.Л., Когут Б.М., Семенов В.М., Тюрина Оберландер М.И., Ваксман Шанбахер Н. Развитие учения о гумусе и почвенном органическом веществе: от Тюрина и Ваксмана до наших дней // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2017. Вып. 90. С. 3-38. doi: 10.19047/0136-1694-2017-3-38
- Наумова Н.Б. К вопросу об определении содержания органического углерода в почве // Почвы и окружающая среда. 2018. № 1(2). С. 98-103.
- Правила для авторов [Электронный ресурс] // Журнал Почвоведение, 2022. URL: <http://eurasian-soil-science.info/images/documents/Rules4authors.pdf> (Дата обр. 10.10.2022).
- Растворова О.Г., Андреев Д.П. Валовой анализ органической части почв // Теория и практика химического анализа почв / Под редак. Л.А. Воробьевой. М., 2006. С. 115-140.
- Савенков О.А., Наумова Н.Б. Заразительное рядом: о некоторых аспектах методологии и терминологии почвенных исследований и публикаций // Почвы и окружающая среда. 2020. Том 3. № 1. с109. DOI: 10.31251/pos.v3i1.109
- Сорокин О.Д. Прикладная статистика на компьютере, 2-е издание. Новосибирск. 2012. 282 с.
- Титлянова А.А., Булавко Г.И., Кудряшова С.Я., Наумов А.В., Смирнов В.В., Танащенко А.А. Запасы и потери органического углерода в почвах Сибири // Почвоведение. 1998. № 1. С. 51-59.
- Титлянова А.А., Булавко Г.И., Миронычева-Токарева Н.П., Хвощевская М.Ф. Запасы органического углерода в почвах западной Сибири // Почвоведение. 1994. № 10. С. 49-53.
- Титлянова А.А., Наумов А.В. Потери углерода из почв Западной Сибири при их сельскохозяйственном использовании // Почвоведение. 1995. № 11. С. 1357-1362.
- Тюрин И.В. Новое видоизменение объемного метода определения гумуса помощью хромовой кислоты // Почвоведение. 1931. № 5-6. С. 36-47.
- Baisden W.T., Amundson R., Cook A.C., Brenner D.L. Turnover and storage of C and N in five density fractions from California annual grassland surface soils // Global Biogeochemical Cycles. 2002. V. 16(4), 1117. DOI:10.1029/2001gb001822.
- Batjes N.H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world // European Journal of Soil Science. 1996. V. 47. P. 151-163.
- Baveye P. C., Palfreyman J., Otten W. Research efforts involving several disciplines: adherence to a clear nomenclature is needed // Water Air Soil Pollution. 2014. Vol. 225. No. 6. Art. 1997. doi: 10.1007/s11270-014-1997-7
- Buringh P. Organic carbon in the soils of the world. In: Woodwell G. (ed) The role of terrestrial vegetation in the global carbon cycle: measurement by remote sensing. SCOPE 23. Wiley, N.Y. 1984. P. 91-109.
- Davidson E.A., Ackerman I.L. Changes in Soil Carbon Inventories Following Cultivation of Previously Untilled Soils // Biogeochemistry. 1993. V. 20. P. 161-193.
- Ewing S.A., Sanderman J., Baisden W.T., Wang Y., Amundson R. // Role of large-scale soil structure in organic carbon turnover: Evidence from California grassland soils. Journal of Geophysical Research – Biogeosciences. 2006. V.111, G03012. DOI:10.1029/2006JG000174.
- Fischlin A., Gyalistras D. Assessing impacts of climatic change on forests in the Alps // Global Ecology and Biogeography Letters. 1997. V.6. P. 19-37.
- Kuceric J., Demyan M.S., Siewert C. Practical application of thermogravimetry in soil science. Part 4. Relationship between clay, organic carbon and organic matter contents // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2016. V. 123, No. 3. P. 2441-2450. doi: 10.1007/s10973-015-5141-8
- Kuceric J., Tokarski D., Demyan M.S., Merbach I., Siewert C. Linking soil organic matter thermal stability with contents of clay, bound water, organic carbon and nitrogen // Geoderma. 2018. V. 316. P. 38-46. doi: 10.1016/j.geoderma.2017.12.001
- Qiu L., Wei X., Zhang X., Cheng J., Gale W., Guo C., Long T. Soil organic carbon losses due to land use change in a semiarid grassland // Plant and Soil. 2012. V. 355. P. 299-309. DOI: 10.1007/s11104-011-1099-x.
- Rolinski S., Prishchepov A.V., Guggenberger G., Bischoff N., Kurganova I., Schierhorn F., Mueller D., Mueller C. Dynamics of soil organic carbon in the steppes of Russia and Kazakhstan

- under past and future climate and land use // *Regional Environmental Change*. 2021. V. 21: 73. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01799-7>.
26. Schlesinger W.G. Soil organic matter: a source of atmospheric CO<sub>2</sub>. *In*: Woodwell G. (ed) *The role of terrestrial vegetation in the global carbon cycle: measurement by remote sensing*. SCOPE 23. Wiley, N.Y. 1984. P. 111-123.
  27. Siewert, C. Method for determining the qualitative composition of the organic soil substance of mineral soils. App. No.: 09/601, 256; PCT Filed: Jan. 30, 1998; PCT Pub. No.: WO99/39180, Aug. 5, 1999; Patent No.: US 6,382,830 B1. 2002.
  28. Siewert C. Rapid screening of soil properties using thermogravimetry // *Soil Science Society of America Journal*. 2004. V.68, No.5. P. 1656-1661. doi: 10.2136/sssaj2004.1656
  29. Siewert C., Demyan M.S., Kucerik J. Interrelations between soil respiration and its thermal stability // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2012. V. 110, No. 1. P. 413-419. doi: 10.1007/s10973-011-2099-z
  30. Skjemstad J.O., Baldock J.A. *Total and Organic Carbon / Soil Sampling and methods of Analysis*. 2nd edition. Boca Raton: CRC Press; 2008. 836 p.
  31. Stevenson F.J. Origin and distribution of nitrogen in soil. *In*: Stevenson F, J, (ed) *Nitrogen in Agricultural Soils*. American Society of Agronomy, Madison, Wis. 1982. P. 1-42.
  32. Stevenson F.J., Cole M.A. *Cycles of soil: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients*. Wiley, N.Y. 1999. 427 p.
  33. Stolbovoy V., Montanarella L., Filippi N., Jones A., Gallego J., Grassi G. Soil sampling protocol to certify the changes of organic carbon stock in mineral soil of the European Union. Version 2. EUR 21576 EN/2. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. 2007. 56 pp.
  34. Tokarski D., Kucerik J., Kalbitz K., Demyan M.S., Merbach I., Barkusky D., Ruehlmann J., Siewert C. Contribution of organic amendments to soil organic matter detected by thermogravimetry // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2018. V. 181. P. 664-674. doi: 10.1002/jpln.201700537
  35. von Lützw M., Kögel-Knabner I., Ludwig B., Matzner E., Flessa H., Ekschmitt K., Guggenberger G., Marschner B., Kalbitz K. Stabilization mechanisms of organic matter in four temperate soils: Development and application of a conceptual model // *J. Plant Nutrition and Soil Sci*. 2008. V.171. P.111-124.
  36. Waksman S.A. What is humus? // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. 1925. V. 11. P. 463-468. doi: 10.1073/pnas.11.8.463
  37. Walkley A., Black I.A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method // *Soil Science* 1934. V.37. P.29-38.