

## Влияние континентальности климата на гумусообразование и элементный состав гуминовых кислот автоморфных почв Сибири

Б. М. КЛЕНОВ, Г. Д. ЧИМИТДОРЖИЕВА\*

*Институт почвоведения и агрохимии СО РАН  
630099, Новосибирск, ул. Советская, 18  
E-mail: klenov@issa.nsc.ru*

*\*Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН  
670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6  
E-mail: galdorj@gmail.com*

### АННОТАЦИЯ

Рассмотрены условия гумусообразования и элементный состав макромолекулы гуминовых кислот автоморфных сибирских почв (серых лесных, черноземов и каштановых) в сравнении с таковыми почвенных аналогов европейской части России. Выявлено, что с возрастанием степени континентальности климата в сходных по генезису почвах в направлении с запада на восток происходят существенные изменения в структуре гуминовых кислот.

**Ключевые слова:** гумус, состав гумуса, гуминовые кислоты, степень бензоидности, континентальность, Сибирь.

Известно, что гуминовые вещества, преобладающие в составе почвенного гумуса, определяют основные экологические функции почвы. Поскольку гуминовые вещества как органоминеральные соединения содержат в своем составе почти весь органический азот почвы и до половины и более органического фосфора и серы, а также макро- и микроэлементы, безусловно, можно рассматривать их как носителей почвенного плодородия. Еще В. В. Докучаев показал, что плодородие почвы определяет одну из основных ее экологических функций. Экологическое значение гуминовых веществ в глобальном масштабе определяется и тем, что они обеспечивают непрерывность малого биологического кру-

говорота веществ на Земле, следовательно, поддерживают фотосинтез и регулируют газовый состав атмосферы.

Почвенные гуминовые вещества представлены гуминовыми кислотами (ГК), фульвокислотами (ФК) и гумином. Соотношение углерода первых двух групп кислот ( $C_{ГК} : C_{ФК}$ ) – устойчивый почвенно-генетический показатель, а ГК – наиболее устойчивые в экологическом отношении соединения. По данному соотношению оценивают общую характеристику природы гумуса. С другой стороны, природа гумуса, соответствующая условиям гумусообразования, – понятие более широкое, как правило, рассматривающееся на уровне молекулярной структуры его основных составляющих (ГК и ФК) в тесной связи с экологией гумусообразования и включающее соотношение в их молекулах ароматической и

Кленов Борис Максимович  
Чимитдоржиева Галина Доржиевна

алифатической частей, содержание функциональных групп, отношение к светопоглощению в различных частях спектра, молекулярную массу и ряд других характеристик. С условиями почвообразования и, соответственно, гумусообразования наиболее четко коррелирует показатель  $C_{ГК} : C_{ФК}$ , а среди составляющих гумуса – общее содержание ГК (степень гумификации) и в особенности их элементный состав.

Задача наших исследований – установление связи между гумусонакоплением и элементным составом ГК в условиях различной степени континентальности климата.

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Рассмотрены условия гумусообразования и элементный состав ГК автоморфных почв Западной Сибири (ЗС) и Восточной Сибири (ВС), формирующихся в условиях континентального и резко континентального климата соответственно. Для сравнения использованы литературные данные по автоморфным, сходным по генезису почвам европейской части России (ЕЧР), формирующимся в условиях умеренно континентального, т. е. более мягкого, климата по сравнению с сибирскими регионами. Необходимость такого сравнительно-географического подхода связана, прежде всего, с тем, что зависимость экологических условий гумусообразования и природа гумуса, например элементный состав ГК, в почвах Сибири изучены слабо. ГК были основным объектом исследования в изученных почвах прежде всего потому, что это самая устойчивая в экологическом смысле, хотя и далеко не всегда преобладающая группа веществ. Нередко значительная по количеству содержанию группа ФК не рассматривается не только из-за трудности их выделения из почв, но и из-за того, что не только элементный состав этих соединений, но и все другие показатели структурно-функционального состояния их молекул в очень слабой степени зависят от типа почвообразования [1, 2]. Частично это показано на примере почв азиатской части России [3]. Анализ длительного опыта исследования ФК позволил сделать заключение, что они представляют собой легко гидролизуе-

мую, отщепляемую часть ГК, а не самостоятельную часть почвенного гумуса [4]. Подавляющая их часть представлена сравнительно низкомолекулярными органическими соединениями, возникающими в ходе выполнения фракционно-группового анализа гумуса. Показатель  $C_{ГК} : C_{ФК}$  следует считать мерой гидролизуемости гуминовых веществ, не придавая ФК значения реально и самостоятельно существующей группы веществ почвенного гумуса. Именно поэтому элементный состав ФК не рассмотрен в сравнении с таковым ГК.

Условия гумусообразования и элементный состав ГК изучены на примере трех типов целинных автоморфных почв: серых лесных, черноземных и каштановых Сибирского региона – Западной Сибири (ЗС – Томская, Новосибирская области и Алтайский край) и Восточной Сибири (ВС – Республика Бурятия и Забайкальский край). Аналогичные данные по соответствующим почвам использованы для территории ЕЧР.

В широтном плане этот ряд почв формируется, как правило, в направлении с севера на юг (по мере усиления сухости климата) примерно от  $55^\circ$  до  $62^\circ$  с. ш. В меридиональном отношении эта широтная полоса с изученными почвами протягивается по территории ЕЧР, ЗС и ВС. Различная степень континентальности убедительно подтверждается установленным ранее коэффициентом (К), возрастающим в меридиональном направлении и достигающим почти предельной величины в ВС [5]. Усиление континентальности климата сопровождается в меридиональном направлении с запада на восток усилением “холодности” почв, которая, в свою очередь, хорошо коррелирует с глубиной их промерзания и с закономерным изменением других абиотических (геоэкологических) факторов гумусообразования (табл. 1). Все изученные почвы ВС, независимо от типа почвообразования, классифицируются как холодные (длительно и глубокопромерзающие) [6].

Данные по элементному составу для ЕЧР взяты из литературы [1, 2]. Выделение препаратов ГК из всех исследованных почв выполнено общепринятым методом [7], а их элементный состав в почвах ЕЧР определен методом сухого сжигания с грави- или волю-

Т а б л и ц а 1

## Климатические показатели изученных регионов

Регион	К	Зона	Почвы	Глубина промерзания, м	Сумма температур > +10 °С	Сумма осадков, мм	Вегетационный период, дни
ЕЧР	133–140	Лесостепь	Серые лесные	0,5–0,8	2400–2600	550–700	175–180
		Степь	Черноземы		2000–3000	270–500	210–240
		Сухая степь	Каштановые		3300–3500	250–400	190–260
ЗС	170–180	Лесостепь	Серые лесные	1,7–2,2	1800–2000	350–520	110–130
		Степь	Черноземы		2000–2400	400–450	146–153
		Сухая степь	Каштановые		1600–2100	180–350	150–160
ВС	190–200	Лесостепь	Серые лесные	2,5–3,2	1400–1800	280–400	125–140
		Степь	Черноземы		1600–1800	300–400	130–150
		Сухая степь	Каштановые		1800–1900	210–260	120–130

метрическим (в случае азота) окончанием. В почвах ЗС элементный состав ГК определен методом сухого сжигания с газовой-хроматографическим окончанием на автоматическом анализаторе СНН-1, в почвах ВС – на автоматическом анализаторе Carlo Erba. Расчет степени бензоидности (ароматичности) (СБ) выполнен по модифицированной формуле Ван-Кревелена [2]. Гумусное состояние изучаемых почв рассмотрено ранее [3, 6, 8]. Сравнение данных элементного анализа, выполненного в разных изученных регионах на различном методическом уровне, проведено с различной долей условности. Вместе с тем предварительно проведенное нами сравнение данных, полученных на одних и тех же образцах ГК с помощью анализатора СНН-1 и классического метода сухого сжигания, позволяет рассматривать в сравнительно-географическом плане наиболее типичные усредненные результаты элементного состава ГК почв аналогичного генезиса, но развивающихся в резко различающихся биоклиматических условиях.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Климатический фактор (инсоляция и количество осадков) в гумусообразовании проявляется косвенно. Общеизвестно, что климат влияет на формирование зональности растительного покрова. Роль растительности наряду с другими представителями живого вещества (почвенной фауной и почвенными микроорганизмами) в зависимости от климатического фактора хорошо изучена. Однако влияние континентальности климата, четко проявляющейся в направлении с запада на восток в пределах России, на накопление гумуса и природу ГК, в частности, малоизвестно.

Сравнительно-географический подход в изучении гумусонакопления показывает, что основной интегральный показатель биологического круговорота органических веществ – запас гумуса – проявляет четкую зависимость от континентальности климата (табл. 2).

В меридиональном направлении в пределах каждого природного комплекса (природ-

Т а б л и ц а 2

## Запас гумуса в верхнем полуметровом почвенном слое (т/га) и соотношение гумусовых кислот

Почвы	Регион					
	ЕЧР		ЗС		ВС	
	Запас гумуса	$C_{ГК}/C_{ФК}$	Запас гумуса	$C_{ГК}/C_{ФК}$	Запас гумуса	$C_{ГК}/C_{ФК}$
Серые лесные	250	1,0–1,5	200	0,7	80	0,8
Черноземы	350	1,7–2,5	250	1,6–2,2	150	1,1–1,5
Каштановые	150	1,2–1,7	100	1,2–1,5	70	0,6–0,8

Т а б л и ц а 3  
Элементный состав ГК

Почвы	Регион	Содержание элементов, атом. %				Атомные отношения			СБ
		С	Н	О	N	Н/С	О/С	С/N	
Серые лесные	ЕЧР	38,1	40,3	19,2	2,4	1,06	0,50	15,9	17
	ЗС	40,4	38,1	19,0	2,4	0,94	0,47	16,7	23
	ВС (Забайкалье)	41,0	37,0	21,1	0,9	0,90	0,51	15,5	24
Черноземы	ЕЧР	42,5	35,2	19,9	2,4	0,83	0,47	17,7	33
	ЗС	40,7	39,3	17,0	2,4	0,96	0,43	17,0	28
	ВС (Забайкалье)	36,0	38,0	24,0	2,0	1,05	0,67	24,5	25
Каштановые	ЕЧР	37,7	42,1	17,4	2,8	1,12	0,46	13,5	16
	ЗС	41,4	36,1	19,9	2,6	0,87	0,45	15,9	32
	ВС (Бурятия)	38,9	40,2	18,2	2,7	1,05	0,47	14,1	21

ной зоны) в почвах одного типа существенно снижается запас гумуса. Усиление континентальности климата сопровождается снижением биологической активности в почвах, наиболее подавленной в глубокомерзлотных почвах ВС, что подтверждается данными табл. 1, в частности запасом тепла (суммой температур выше +10 °С) и продолжительностью вегетационного периода. С усилением континентальности климата в составе гумуса снижается роль гуминовых кислот и возрастает – фульвокислот, о чем свидетельствуют отношения углерода этих кислот ( $C_{ГК} : C_{ФК}$ ), тесно связанной с интенсивностью биологической активности почв. Кроме того, соотношение этих кислот является устойчивым почвенно-генетическим показателем, и его снижение в меридиональном направлении вызвано, скорее всего, усилением континентальности климата.

Таким образом, сравнительно-географический анализ гумусообразования показывает, что одним из определяющих факторов накопления гумуса в почвах может быть климат, в особенности его континентальность. С ее усилением не только ослабляется запас гумуса в почвах, но и изменяется его качественный состав в сторону образования более упрощенных форм гуминовых веществ.

Почвенно-экологическая и почвенно-генетическая интерпретация элементного состава органических соединений почвы всегда представляет затруднение в связи с многообразием причин его варьирования. Хотя элементный состав ГК в целом характерен для

данной группы соединений (табл. 3), однако резко контрастные региональные климатические условия опосредованно через физико-химические процессы, протекающие неодинаково в разных типах почв, сказываются на структуре гумуса на молекулярном уровне [9]. В данном случае результаты можно рассматривать в сравнении зональных типов почв внутри каждого региона, а также со сходными по генезису типами почв по разным территориям с запада на восток.

Если рассмотреть вначале элементный состав ГК зональных типов почв внутри каждой территории, то в почвах ЕЧР обуглероженность молекулы ГК и, соответственно, СБ наибольшие в черноземах, уменьшаются к северу в серых лесных почвах и к югу – в каштановых, что объясняется закономерным изменением комплекса биоклиматических условий (см. табл. 1) и находится в соответствии с теорией гумификации [2].

Это правило несколько нарушается в почвах ЗС, где обуглероженность ГК и их СБ, хотя и незначительно, возрастают в ряду от серых лесных почв к черноземам и каштановым почвам; в этом же направлении можно отметить снижение величины Н : С. Снижение Н : С, как правило сопровождающееся в этом направлении повышением СБ, – явление закономерное и согласуется с общеизвестным фактом обратной взаимозависимости этих показателей. С другой стороны, каштановые почвы ЗС, представленные в данном сообщении подтипом темно-каштановых, характеризуются именно такими значениями СБ и в

других засушливых районах России [2]. Отмечены и более высокие значения СБ в каштановых почвах ЕЧР, приведенные в одной из наших публикаций [3]. Следовательно, более высокая СБ ГК каштановых почв ЗС, чем черноземов, не является аномалией. Представляется, что расширенный банк данных по элементному составу ГК, полученных унифицированными современными методами элементного анализа для широкого спектра и ареала распространения подтипов черноземов и каштановых, позволит более четко выявить закономерности изменения природы ГК как в широтном, так и в меридиональном направлении.

С более резким усилением континентальности в Забайкалье закономерность, обнаруженная в молекулах ГК в зональном ряду ЕЧР и ЗС, не наблюдается: самая высокая обуглерожённость молекулы ГК отмечена в серых лесных почвах (см. табл. 3). В почвах этого типа СБ у ГК в ЗС и ВС практически одинакова. И это, видимо, не случайно, поскольку сравнение биоклиматических условий гумусообразования показало, что в этих двух регионах Сибири условия тепло- и влагообеспеченности в серых лесных почвах, развивающихся, как правило, под пологом березово-осиновых лесов, нередко с примесью бобовых в травостое, сравнительно близки. Более четко отличаются эти два региона Сибири друг от друга и в особенности от ЕЧР по продолжительности периода биологической активности (вегетационному периоду). Представляется, что сочетание тепла и влажности – более важный климатический фактор, чем продолжительность периода биологической активности, которая, скорее всего, определяет масштаб накопления ГК, а не их природу.

Одной из отличительных особенностей элементного состава ГК почв ВС (Забайкалья) является самое низкое значение углерода в молекуле ГК бескарбонатных черноземов. Видимо, в данном случае сказывается влияние не только растительного фактора, но и особенностей почвообразующей породы (элювиоделювий глинистых и хлоритовых сланцев) – необычно низкая сумма поглощенных оснований (12,5 мг-экв/100 г) при слабокислой реакции среды. При таких условиях образуются хотя и маломощные черноземы, но

с повышенным содержанием гумуса (более 8 %), ГК в составе которого имеют характерное для почв данного типа значение СБ. Таким образом, в любом случае содержание углерода в ГК не является основным показателем, по которому нужно судить о причине различий в природе ГК. Принципиальными и интегральными показателями в таких случаях являются величины Н : С и СБ.

Следующей отличительной чертой элементного состава ГК самых восточных в России каштановых почв оказалось неожиданно высокое значение СБ, которое здесь не очень сильно выделяется, как и в ЗС, на фоне соответствующих значений для ГК черноземов. Этот факт, видимо, объясняется тем, что нарастание аридности климата, т. е. возрастание запаса тепла и снижение количества осадков, по данным табл. 1, от лесостепи к сухой степи в Сибири, особенно в ВС, происходит не так контрастно, как в ЕЧР. Поэтому значения СБ для ГК черноземов и каштановых почв схожи и укладываются в пределы одной градации. Таким образом, элементный состав ГК сибирских почв, в особенности Забайкалья, имеет свои особенности, обусловленные комплексом причин, что отмечено полвека тому назад [10].

Рассмотрим химическую структуру молекулы ГК сходных по генезису почв в направлении с запада на восток, т. е. в сравнении между территориями: ЕЧР, ЗС, ВС (см. табл. 3). Данные свидетельствуют о том, что в сибирских серых лесных почвах по сравнению с аналогами ЕЧР в элементном составе ГК прослеживается более сильно выраженная ароматическая природа макромолекул. Факт оказался интересным, но несколько противоречащим теории гумификации. Снижение величины Н : С при увеличении СБ снимает все противоречия. Кроме того, поскольку классификация ГК по СБ еще не разработана окончательно, то вполне возможно, что по этому показателю (17, 23, 24) ГК изученных серых лесных почв могут находиться в одной градации (средней).

Что касается элементного состава ГК черноземов, то по территориям выявлены различия. Эти различия наиболее отчетливы при сравнении значений СБ, снижающихся в меридиональном направлении, т. е. по мере усиления континентальности климата. Обратную



зависимость показывают величины  $H : C$ , вписывающиеся наряду с  $СБ$  в теорию гумификации. Черноземы  $ЕЧР$  формируются в мягком климате, при благоприятных микробиологических условиях, где образуются  $ГК$  с наиболее конденсированной макромолекулой. В длительно и глубокопромерзающих черноземах Сибири с резкими амплитудами как суточных, так и межсезонных температур, с пульсирующим характером микробиологических процессов [11] образуются менее конденсированные молекулы  $ГК$ .

Элементный состав каштановых почв ничем не выделяется на фоне  $ГК$  всех изученных почв. В меридиональном направлении, если судить строго по приведенным данным, никакой закономерности нет. Как уже отмечено, в Сибири наиболее сходны по химической природе  $ГК$  почв черноземного и каштанового типа, но в целом  $СБ$  в  $ГК$  каштановых почв  $ЗС$  более высокая, даже если принять во внимание более низкие значения, приводимые другими авторами [2].

Важный элемент, входящий в состав  $ГК$ , – азот содержится в них в незначительных количествах, что закономерно. Низкое содержание азота подтверждается и атомными отношениями  $C : N$ . Большая часть его в  $ГК$  всех изученных почв, видимо, как и вообще во всех почвах, в основном содержится в  $ФК$ , как в соединениях с наиболее развитыми по сравнению с  $ГК$  алифатическими цепями. По величине  $C : N$  можно отметить, что во всех регионах наиболее обогащены азотом  $ГК$  серых лесных и каштановых почв, что на данном этапе исследования не находит объяснения. Не отмечено связи между  $C : N$  и  $СБ$ , что также закономерно в связи со сложностью поведения этого элемента в метаболических процессах в ходе биологического круговорота.

Закономерное изменение структурных параметров ( $СБ$  и  $H : C$ ) происходит в каждом из изученных регионов и, как правило, от серых лесных почв к черноземам и от черноземов к каштановым почвам. Интересная закономерность наблюдается в изменении интервала величин  $СБ$  в меридиональном направлении. В  $ЕЧР$  значения  $СБ$  от минимальных до максимальных изменяются в пределах 16–33, в  $ЗС$  – 23–32 и  $ВС$  – 21–25. Таким образом, амплитуда значений  $СБ$  максимальна в  $ЕЧР$  и минимальна в  $ВС$ . И хотя

в целом все эти значения на сегодняшний день можно включить в одну-две градации, тем не менее предварительный аналитический обзор имеющихся данных позволяет судить о том, что степень континентальности представляет одну из существенных составляющих климатического фактора, принимающего участие в гумусообразовании и, в определенной степени, в формировании  $ГК$  почв.

Минимальная амплитуда значений  $СБ$  для почв  $ВС$  согласуется с не столь значительными изменениями гидротермических показателей с севера на юг в пределах распространения изученных почв, что соответствует всему комплексу условий почвообразования. Достаточно отметить, что в  $ВС$  практически не выражена широтная зональность, почвы здесь, в частности в Забайкалье, не составляют сплошные зоны, а встречаются отдельными пятнами, островками, больше проявляется вертикальная зональность с проявлением котловинного эффекта. Кроме того, климат формируется под влиянием трех контрастных компонентов – сухого и холодного климата северных областей Сибири, жаркого и сухого монгольских пустынь, теплого и влажного тихоокеанского. Поэтому в Забайкалье часто контактируют очень контрастные ландшафты – сухая степь и тайга с проявлением криогенных процессов, что оказывает, по видимому, нивелирующее влияние на природу  $ГК$  в основных типах почв.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительно-географический анализ гумусообразования, проведенный на примере трех основных типов почв в трех крупных регионах России, показал, что одним из определяющих факторов накопления гумуса в почвах может быть климат, в особенности его континентальность. С ее усилением не только уменьшается запас гумуса в почвах, но и изменяется его качественный состав в сторону образования более упрощенных форм гуминовых веществ. В соответствии с изменением размеров накопления гумуса в почвах происходит и изменение природы одной из основных экологически наиболее устойчивых его составляющих –  $ГК$ . Анализ структуры  $ГК$  лесостепных и степных почв Сибири в сравнении с таковым  $ЕЧР$  показал, что в

пределах России от серых лесных почв до черноземов и каштановых почв ГК формируются в соответствии с теорией гумификации, разработанной Д. С. Орловым. СБ ГК является отличительным диагностическим почвенно-генетическим признаком только в почвах контрастного генезиса. В направлении с запада на восток с усилением континентальности климата от умеренно континентального до континентального и резко континентального СБ ГК имеет тенденцию к снижению в почвах черноземного типа. Кроме того, усиление континентальности климата приводит к сглаживанию различий в структуре ГК между основными типами почв.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Орлов Д. С. Гумусовые кислоты почв. М.: Изд-во МГУ, 1974. 332 с.
2. Орлов Д. С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: Изд-во МГУ, 1990. 272 с.
3. Кленов Б. М. Устойчивость гумуса автоморфных почв Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 176 с.
4. Орлов Д. С. Почвенные фульвокислоты: история их изучения, значение и реальность // Почвоведение. 1999. № 9. С. 1165–1171.
5. Иванов Н. Н. Пояса континентальности Земного шара // Изв. Всесоюз. географ. об-ва. 1959. № 5. С. 410–423.
6. Чимитдоржиева Г. Д. Гумус холодных почв. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990. 145 с.
7. Орлов Д. С., Гришина Л. А. Практикум по химии гумуса. М.: Изд-во МГУ, 1981. 272 с.
8. Кононова М. М. Органическое вещество почв. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 314 с.
9. Chimitdorzhieva G., Klenov B. Elemental Composition of Humic Acids of Automorphic Forest Steppe and Steppe Soils of Northern Eurasia // Proceedings Book of the Communications presented to the 15th Meeting of the International Humic Substances Society Tenerife – Canary Islands. June 27 – July 2, 2010. Vol. 1. P. 81–84.
10. Ногина Н. А. Почвы Забайкалья. М.: Наука, 1964. 312 с.
11. Нимаева С. Ш. Микробиология криоаридных почв. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1992. 172 с.

## Humus Formation and Elemental Composition of Humic Acids of the Automorphic Soils of Siberia

B. M. KLENOV, G. D. CHIMITDORZHIEVA\*

*Institute of Soil Science and Agrochemistry of SB RAS  
630099, Novosibirsk, Sovetskaya str., 18  
E-mail: klenov@issa.nsc.ru*

*\*Institute of General and Experimental Biology of SB RAS  
670047, Ulan-Ude, Sakhyanova str., 6  
E-mail: galdorj@gmail.com*

The humus formation and elemental composition of the macromolecules of humic acids have been considered for the example of automorphic soils of Siberia such as grey forest soils, chernozems and chestnut soils as compared to those of the analogous soils of the European part of Russia. It has been revealed that with an increase in the continentality of climate the essential changes in the structure of humic acids in soils of similar genesis occur in the meridional direction.

**Key words:** humus, humus composition, humic acids, degree of aromaticity (benzoidity), continentality, Siberia.