

3. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод за период с 1937-2018 гг. – Минск.– 1937 – 2018.
4. Каталог опасных гидрологических явлений на реках территории Беларуси за 2010–2015 гг.
5. Нежиховский Р.А. Наводнения на реках и озерах. – Л. – 1988.
6. Стихийные гидрометеорологические явления на территории Беларуси: справочник. – Минск. – 2002.

УДК 661.183:665.7.032.5

А. Р. Цыганов, проф., д-р с.-х. наук  
БГТУ, г. Минск;

А. Э. Томсон, доц., канд. хим. наук; Т. В. Соколова, доц., канд. техн. наук;  
В. С. Пехтерева, науч. сотр.

Институт природопользования НАН Беларуси, г. Минск;

А. С. Орлов, мл. науч. сотр.; С. Б. Селянина, доц., канд. техн. наук;

М. В. Труфанова, канд. хим. наук; Т. И. Пономарева, мл. науч. сотр.;

О. Н. Ярыгина, мл. науч. сотр.; И. Н. Зубов, канд. хим. наук

ФБГУН Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики  
имени академика В. П. Лаверова РАН, г. Архангельск

## ГЕОКЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ КАК ФАКТОР ВЛИЯНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ОРГАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ВЕРХОВОГО ТОРФА

Торф, как один из основных компонент болотных экосистем, принимает активное участие в глобальном круговороте углерода и выполняет геобарьерные функции [1, 2]. Помимо того, он представляет собой значимый сырьевой ресурс как медленно возобновляемые органические ископаемые. Преимущественно торф рассматривается как источник энергии. Учитывая разнообразие входящих в его состав органических веществ различной природы, более перспективной следует считать комплексную химическую переработку с получением целого ряда ценных продуктов и новых материалов. Как следствие, в последние годы наблюдается заметный рост числа исследований в направлении химии торфа [2, 3].

Биогеотрансформация органических соединений в процессе торфонакопления в условиях холодного климата протекает замедленно и растянута во времени. Это сопряжено с существенным изменением химических и микробиологических режимов, а, соответственно, и механизмов гумификации. Поэтому изучение торфогенеза в условиях Севера позволяет выделить и более подробно исследовать стадии процесса. Вместе с тем, по данному вопросу встречаются только единичные публикации последних лет [4].

Расширить представления в обозначенной области позволяет сравнительный анализ (на примере Европейского Севера России и Беларуси) стратиграфических особенностей и группового химического состава органической части верхового торфа, сформированного в различных геоклиматических условиях.

В качестве объекта исследования использовали пять репрезентативных послойно усредненных образцов верхового торфа мохового типа, отобранных на разной глубине. Отбор проводили на территории грядово-мочажинного комплекса Иласского болотного массива (Архангельская обл., Приморский район). Основные растения торфообразователи – сфагновые мхи. В качестве образцов сравнения использовали торф, близкий по гидрологическим условиям формирования, ботаническому составу и степени разложения, из залежей Беларуси и Юга Архангельской области.

Полученные образцы натурального материала предварительно высушивали до воздушно сухого состояния и просеивали на сите 2 мм. Снимки временных водных препаратов получали при помощи микроскопа Axio Scope A1 Zeiss в комплекте с цифровой камерой Canon G10.

Оценку группового компонентного состава образцов торфа проводили методом последовательной разборки с использованием растворителей различной природы. Из исходного образца последовательно выделяли: экстрактивные вещества обработкой этоксиэтаном в аппарате Сокслета, биополимеры гумусовой природы 0,1 н. раствором гидроксида натрия, легкогидролизуемые соединения 5 %-ым раствором соляной кислоты, далее в полученном остатке определяли содержание лигнина Классона и трудногидролизуемых веществ. Расчёт содержания групповых компонентов проводили весовым методом по остатку [5].

Спектры ЭПР анализируемых образцов записывались одновременно с эталонным образцом на основе порошка MgO, содержащего микропримеси ионов  $Mn^{2+}$  и  $Cr^{3+}$ , разработанным в Институте природопользования НАН Беларуси. Это позволило повысить точность определения параметров сигнала ЭПР и контролировать уровень СВЧ-мощности в рабочем резонаторе прибора. Данный эталон использовался и для определения масштаба развертки между 3 и 4 компонентами сверхтонкой структуры (СТС) спектра ионов  $Mn^{2+}$ , равному 87 Гс. В случаях, когда амплитуда высокочастотной (ВЧ) модуляции выбиралась не слишком малой по сравнению с шириной линии  $\Delta H$ , вводилась поправка на амплитудное уширение. Данный эталон использовался и при расчетах g-фактора, точность его определения составляла  $\pm 0,0002$ . По отношению амплитуд сигналов 4-ой компоненты СТС  $Mn^{2+}$  и ионов  $Cr^{3+}$  контролировался уровень СВЧ-мощности, поступающей в резонатор. Первичным эталоном для определения концентрации парамагнитных центров (ПМЦ) служил витринит, число спинов в котором составляло  $3,1 \cdot 10^{17}$  сп, а g-фактор – 2,0036.

Формирование торфяной залежи – длительный процесс, который занимает сотни и тысячи лет. Условия, в которых находится торф, постоянно изменяются и зависят от времени образования. В настоящее время наиболее популярной является гидротермическая гипотеза формирования торфяных залежей, согласно которой в торфяной залежи можно выделить два принципиально отличающихся слоя торфа: верхний торфогенный слой и нижний – слой консервации, границей которых является уровень колебания грунтовых вод и аэробные условия сменяются анаэробными. Следует отметить, что для торфяных залежей, сформированных в условиях холодного климата Субарктики, можно выделить промежуточный слой, границами которого является уровень грунтовых вод и глубина промерзания торфяной залежи, и существует вероятность проникновения кислорода воздуха в зимний период. Для выбранных тестовых площадок в районе Иласского болотного массива и Кеназерского национального парка средний показатель уровня грунтовых вод составляет 25–30 см, уровень промерзания – 60–80 см.

По современным представлениям именно в верхнем относительно молодом и биологически деятельном слое в основном и происходит преобразование растительных остатков и формирование химического состава и структуры торфа. При этом ключевую роль играют климатические факторы: температурный режим и уровень осадков, определяющие биологически активный период и окислительный режим торфогенного слоя.

Согласно экспериментальным данным (рис. 1) торф, сформированный в условиях Субарктики, отличается меньшей степенью биодegradации, чем в однотипных залежах на территориях с более теплым климатом. Микрофотоснимки демонстрируют большую сохранность растительных остатков и меньшую долю бесструктурной аморфной массы в первом случае.

Согласно гидротермической гипотезе торфообразования именно в верхнем относительно молодом и биологически деятельном слое в основном и происходит преобразование растительных остатков и формирование химического состава и структуры торфа. При этом ключевую роль играют климатические факторы: температурный режим и уровень осадков, определяющие биологически активный период и окислительный режим торфогенного слоя.

Так торф, сформированный в условиях субарктического морского климата, отличается достаточно высоким содержанием фульвокислот, для него характерны фульватный и фульватно-гуматный типы гумусообразования, а также высокое содержание негидролизуемого остатка – лигнина Классона (табл. 1).



а



б

**Рисунок 1 – Структура верхового торфа сформированного в различных климатических зонах: а) субарктический морской климат; б) континентальный климат**

При этом у образцов с одинаковой степенью разложения можно отметить с повышением широтности некоторое увеличение доли фульвокислот в составе гумусовых кислот (табл. 1). Это свидетельствует о фульватном типе гумусообразования, что может объясняться как спецификой биосинтеза исходных растений-торфообразователей, так и особенностями биогеотрансформации растительных остатков в условиях холодного климата. Обращает на себя внимание высокое содержание негидролизуемого остатка, определяемого как лигнин Классона, в этих образцах, достигающее значений, характерных обычно для торфа с более высокой степенью разложения.

**Таблица 1 – Групповой состав малоразложившегося верхового торфа, сформированного в различных климатических зонах**

R, %	A, %	Содержание, % от органических веществ							Источник
		ЭВ	ГФК	ФК/ГК	ВРВ	ЛГВ	ТГВ	ЛК	
<i>Субарктический морской климат (Архангельская обл.)</i>									
5-10	0,8	4,7	14,3	3,5	0,4	39,3	22,1	19,7	*
<i>Умеренно-континентальный климат (Архангельская обл.)</i>									
10-15	1,8	5,2	33,4	Н	Н	40,9		20,5	[20]
<i>Умеренно-континентальный климат (Центральная Россия)</i>									
10-15	Н	Н	13,4	2,1	Н	Н	Н	Н	[25]
10-15	Н	0,9	30,9	0,7	16,9	31,7	8,4	20,8	[26]
5-10	Н	Н	13,4	2,0	Н	Н	Н	Н	[25]
5-10	Н	1,0	12,3	2,3	2,6	8,3	33,6	15,5	[26]
<i>Умеренно-континентальный климат, переходный к южному (Беларусь)</i>									
15-20	5,1	4,5	43,9	3,1	0,4	16,1	4,7	30,4	*
10-15	Н	4,6	35,4	1,0	7,3	42,8	8,8	6,2	[27]
10-15	1,6	Н	21,3	Н	Н	29,1	14,6	45,1	[28]
5-10	Н	4,4	12,3	Н	4,5	65,8	15,8	2,0	[2]
5-10	Н	1,6	13,8	Н	7,4	45,5	26,0	5,7	[15]
<i>Континентальный климат (Западная Сибирь)</i>									
20-25	9,3	5,1	32,0	1,8	1,4	35,7		25,8	*
5-10	1,6	4,2	30,9	1,3	4,0	46,8	7,6	6,5	[29]
5-10	Н	4,2	29,3	Н	1,4	49,5	11,0	5,9	[16]

Примечание: R – степень разложения, A – зольность, ЭВ – экстрактивные вещества, ГФК – гумусовые кислоты, ГК – гуминовые кислоты; ФК – фульвокислоты; ВРВ – водорастворимые вещества, ЛГВ – легкогидролизующие вещества, ТГВ – трудногидролизующие вещества, ЛК – лигнин Классона (негидролизующий остаток), Н – не указано в источнике. \* Анализ выполнен по авторской методике [5].

Считается, что химический состав органической части торфа зависит в основном от его ботанического состава, степени разложения и геоклиматических условий формирования, однако, даже в генетически однородной залежи он в значительной мере меняется с глубиной залегания (рис. 2). Это, по-видимому, вызвано неоднородностью окислительных и микробиологических режимов. Характерно, что отмеченные изменения достаточно ярко проявляются не только в торфогенном слое, но и на глубинах ниже зоны промерзания в анаэробных условиях.

Нелинейность перераспределения групп веществ в составе органической массы торфа с глубиной залегания, по-видимому, объясняется совместным протеканием разнонаправленных деструкционных и конденсационных окислительных процессов – гумификации и минерализации. Рассматривая отдельные группы веществ, можно выделить ряд закономерностей. Например, наблюдается достаточно выраженная тенденция роста содержания экстрактивных веществ с глубиной залегания, при этом в ходе биогеохимической трансформации изменяется не только их количественное содержание, но и качественный состав, о чем говорит постепенный переход окраски от желто-зеленой (в верхнем слое) через желтовато-коричневую до коричнево-красной в нижнем слое. Схожая тенденция отмечена нами ранее для битумов, выделенных из верхового торфа при движении от более северных территорий, к более южным районам. Вероятно, чем период биологической активности длительнее, тем более интенсивно протекает трансформация битумной части органического вещества торфа.

Достаточно четко проявляется симбатное изменение содержания гумусовых кислот (ГФК) и битумов (ЭВ) с глубиной залегания (рис. 2). Можно предполагать, что таким образом проявляется образование систем межмолекулярного полисопряжения в первом случае и квазиполисопряжения во втором, придающих с одной стороны устойчивость к деградации молекулярных структур, а с другой – способствующих протеканию конденсационных процессов.

Поскольку гумификация является одним из ключевых процессов трансформации растительных остатков и формирования органической части торфа, с ростом глубины залегания и степени деградации торфа можно ожидать существенных изменений в групповом составе гумусовых веществ.

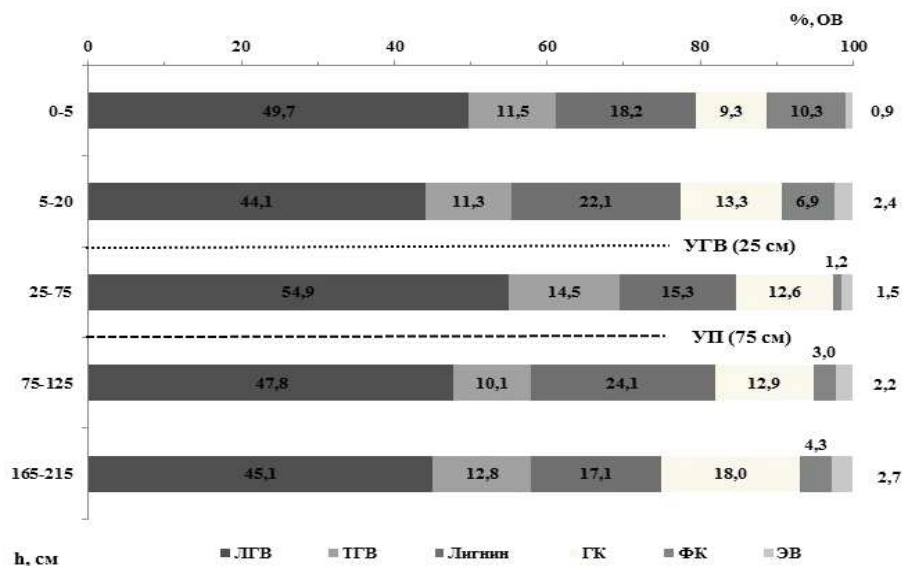


Рисунок 2 – Стратиграфическое распределение основных групповых компонентов в торфяной залежи верхового типа, расположенной в зоне субарктического климата

Из полученных данных (рис. 2) видно, что вклад гуминовых кислот в суммарное содержание гумусовых кислот увеличивается при движении вглубь залежи. Однако данная тенденция охватывает лишь торфогенный слой и зону промерзания, где происходит переход от аэробных условий к анаэробным. По-видимому, процесс окислительной конденсации



фенольных соединений, которые входят в состав фракции фульвокислот и могут выступать в качестве материала для синтеза гуминовых кислот, наиболее эффективно протекает в присутствии кислорода воздуха. Это позволяет сделать вывод о том, что гумусообразование в верхнем слое залежи с большей долей вероятности происходит по конденсационному механизму. В отношении гумификации при недостатке или практически полном отсутствии кислорода считается, что она протекает наиболее вероятно по механизму окислительного кислотообразования, в ходе которого происходит постепенная деградация органического вещества и «созревание» гуминовых кислот. Следует отметить, что в анаэробных условиях, т. е. в зоне консервации, существует вероятность протекания окислительно-восстановительных процессов за счет металлов с переменными валентностями, процессов нитрификации, сульфатредукции и метаногенеза в ходе жизнедеятельности анаэробных микроорганизмов. Выявленные закономерности требуют дополнительного рассмотрения.

Информативным методом характеристики подобных систем считается ЭПР-спектроскопия, поскольку парамагнетизм торфа и гуминовых кислот обусловлен не классическими свободными радикалами той или иной природы, а выигрышем энергии при формировании надмолекулярных ассоциатов вследствие синергического эффекта взаимодействия ароматических фрагментов и водородных связей функциональных групп. Необычную стабильность сигнала ЭПР и высокую чувствительность его параметров к структуре полисопряженных систем обуславливает делокализация неспаренного электрона, который, в отличие от классических свободных радикалов, не находится в пределах изолированного молекулярного фрагмента. Соответственно, в рассматриваемых парамагнитных ассоциатах имеет место не миграция неспаренного электрона собственно как частицы, а делокализация его спиновой плотности.

Учитывая информацию о влиянии климатических условий на состав торфяных битумов и их парамагнетизме, спектры ЭПР записывали не только у исходных, а и у обезбитуминированных образцов торфа, а также выделенных из последних гуминовых кислот (табл. 2).

**Таблица 2 – Влияние климатических условий и фракционирования на спектры ЭПР торфа и гуминовых кислот**

Образец	$\Delta H_{0,1 \text{ мВт}}, \text{ Гс}$	$\Delta H_{50 \text{ мВт}}, \text{ Гс}$	g-фактор	$I, 10^{17} \text{ сп/г}$	$A/A_0^*$
<i>Субарктический морской климат (Архангельская обл.)</i>					
Исходный торф	3,1	2,8	2,0036	0,9	1,8
Торф без битумов	4,2	4,2	2,0035	3,0	2,9
Гуминовые кислоты	3,6	3,6	2,0031	3,0	1,4
<i>Умеренно-континентальный климат (Архангельская обл.)</i>					
Исходный торф	4,1	3,3	2,0035	1,6	1,6
Торф без битумов	4,1	4,4	2,0038	2,2	3,3
Гуминовые кислоты	3,9	3,9	2,0035	4,4	1,7
<i>Умеренно-континентальный климат, переходный к южному (Беларусь)</i>					
Исходный торф	3,8	3,9	2,0031	5,5	3,5
Торф без битумов	3,6	4,2	2,0035	5,2	3,6
Гуминовые кислоты	2,9	3,6	2,0033	7,8	1,6

\* Отношение амплитуд сигналов, снятых при 50 и 0,1 мВт.

Следует особо отметить, что препаратами для ЭПР-спектроскопии служил торф одинаковой степени разложения ( $R = 10\text{--}15\%$ ) и сходного ботанического состава (сфагнум торф). Принимая во внимание невысокую степень разложения исследуемых образцов верхового малозольного торфа, представляется закономерной более высокая интенсивность сигнала ЭПР гуминовых кислот по сравнению с исходным торфом. Интересно, что у образцов торфа северного региона при обезбитуминировании наблюдается повышение интенсивности и уширение сигнала ЭПР при сравнительно слабом насыщении его СВЧ-мощностью, о чем свидетельствует высокое значение параметра  $A/A_0$ . При этом в случае субарктического морского климата фиксируется равная интенсивность сигналов ЭПР обезбитуминированного торфа и гуминовых кислот (табл. 2), что согласуется с упомянутыми выше

особенностями его группового состава. Полученные результаты можно интерпретировать следующим образом. Торфяные битумы, оказывая обволакивающее действие на основные высокомолекулярные компоненты торфяного субстрата, препятствует формированию «плоскостных» систем полисопряжения, с наличием которых связан в основном парамагнетизм торфа. Данные ЭПР–спектроскопии подтверждают изложенные выше представления о существенном влиянии климатических особенностей на процессы деградации исходных растений–торфообразователей. Специфичностью состава битумной части торфа, сформированного в условиях Европейского Севера РФ, объясняется особый эффект их воздействия на трансформацию органического вещества. Вклад битумов в процесс торфообразования обусловлен, по видимому, их высокой обволакивающей способностью, что затрудняет межмолекулярное взаимодействие ароматических фрагментов и препятствует формированию систем полисопряжения, являющихся одним из основных структурных элементов гумусовых веществ.

Таким образом, важнейшей отличительной особенностью верхового торфа, сформированного в условиях субарктического морского климата, является низкий показатель глубины гумификации и достаточно выраженное преобладание фульватного типа гумусообразования, что обусловлено наличием особых климатических воздействий и, в частности, промерзания залежи, как фактора, оказывающего существенное влияние на формирование структуры и группового химического состава торфа. При этом окислительные режимы и кинетика процессов гумификации растительных остатков в верхних и нижних слоях залежи может существенно отличаться.

Выявлена экранирующая роль битумов при образовании межмолекулярных агрегатов ароматических компонентов торфа, которая вносит существенный вклад при гумификации растительных остатков в ходе торфонакопления и обусловлена, прежде всего, торможением формирования структур полисопряжения, являющихся основным структурным фактором гуминовых веществ.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ проект № 18-05-70087*

#### Список использованных источников

1. Орлов, Д. С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации / Д. С. Орлов. – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 332 с.
2. Бамбалов, Н. Н. Баланс органического вещества торфяных почв и методы его изучения / Н. Н. Бамбалов. – Минск: Наука и техника, 1984. – 175 с.
3. Томсон, А. Э. Торф и продукты его переработки / А. Э. Томсон, Г. В. Наумова. – Минск: Бел. наука, 2009. – 280 с.
4. Компонентный состав и структурная организация торфа болотных массивов Европейского севера России / Л. Н. Парфенова [и др.]// Вестник САФУ. – Сер. Естественные науки. – 2014. – № 4. – С. 143–154.
5. Методика измерений группового химического состава торфа гравиметрическим методом: свидетельство об аттестации № 88-16365-009-RA.RU.310657-2017. – Архангельск, 2017. – 20 с.

УДК 35.073.515.4:

Г.И. Глазачева, Т.А. Курлович  
РУП «Бел НИЦ «Экология»

### ОЦЕНКА ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРНЫЙ ВОЗДУХ БРЕСТСКОЙ ОБЛАСТИ ПО ИТОГАМ ОБРАБОТКИ ФОРМЫ ГОССТАТОТЧЕТНОСТИ 1-ВОЗДУХ (МИНПРИРОДЫ)

Оценка выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных источников на основании анализа официальной статистической информации о выбросах в территориально-административном разрезе (республика, область (г. Минск), район, город)