УДК 556:550.461:547.99/.916/.915.5

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ГЕОКЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА СОСТАВ И ПЕРЕНОС ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ВОДНО-БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМ

Селянина С.Б., Кокрятская Н.М., Пономарева Т.И., Ярыгина О.Н., Труфанова М.В.
ФБГУН «Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики РАН», Архангельск, e-mail: smssb@yandex.ru

Арктический бассейн является активным звеном глобального кругооборота вещества и формирования климата Земли. Актуальность исследования биогеохимических процессов, протекающих в водоемах субарктического и арктического регионов, определяется, прежде всего, нестабильностью их экологического состояния в условиях изменения климата. Водосбор Белого моря характеризуется высокой заболоченностью вследствие постоянного переувлажнения и низких годовых температур территорий, что существенно влияет на состав водотоков. В статье на примере Иласского болотного массива исследован макрокомпонентный состав торфяных природных матриц. Выявлено существенное отличие процессов биодеградации органического вещества природных матриц в условиях холодного климата. Обоснована целесообразность более подробного изучения влияния геоклиматических условий западного сегмента Севера России на перенос веществ и протекание биогеохимических процессов в сопряжении с анализом органического вещества почв, воды и донных осадков.

Ключевые слова: органическое вещество, гуминовые вещества, битумы, водно-болотные экосистемы, геоклиматические условия, водосбор Белого моря

TO THE QUESTION OF THE INFLUENCE OF GEOCLIMATIC CONDITIONS ON THE ORGANIC MATTER COMPOSITION AND TRANSPORT OF BOG-AQUATIC ECOSYSTEMS

Selyanina S.B., Kokryatskaya N.M., Ponomareva T.I., Yarygina O.N., Trufanova M.V.
Federal Center for Integrated Arctic Research of Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, e-mail: smssb@yandex.ru

Arctic Basin is an active link in the global substance cycle and in the Earth's climate formation. The actuality of investigation of the biogeochemical processes occurring in the waters of the Arctic and Subarctic regions is determined, above all, by the instability of their ecological state in the context of climate change. The White Sea water-producing area is characterized by high bogginess, arising from permanent waterlogging and low annual temperatures of the region, which influence on the composition of the water courses. The macrocomponent composition of peat native matrices (using Ilassky bog massive as an example) was studied in this paper. Big difference in the native matrices' organic matter biodegradation processes under the cold climate conditions is indicated. Reasonability of more detailed study of influence of the geo-climatic conditions of the Russian North western segment on the mass transfer and biogeochemical processes behavior coupling with soil, water and benthic sediments organic matter analysis is proved.

Keywords: organic matter, bog-aquatic ecosystems, humic substances, bitumen, geo-climatic conditions, White Sea water-producing area

Арктический бассейн является активным звеном глобального кругооборота вещества и формирования климата Земли. Для России Арктика имеет особое значение – её ресурсы, экологическое состояние, факторы, определяющие климат, оказывают прямое влияние на экономику и условия жизни на огромной территории страны, примыкающей к Арктическому бассейну.

Актуальность исследования биогеохимических процессов, протекающих в водоемах субарктического и арктического регионов, определяется, прежде всего, нестабильностью их экологического состояния в условиях изменения климата. Согласно данным межправительственной группы экспертов по изменению климата [7], подтвердивших тезис о глобальном потеплении, арктический регион является наиболее чувствительным к внешним как естественным, так и антропогенным воздействиям. В течение тысяч лет арктическая тундра накапливала органическое вещество, являясь стоком углерода для атмосферы [8]. Потепление в высоких широтах способствует таянию вечной мерзлоты, при этом законсервированная в криолитозоне органика начинает поступать в глобальный кругооборот, что приводит к нарушению локальных и региональных биогеохимических циклов химических элементов.

Водосборные территории Севера России характеризуются высокой заболоченностью вследствие постоянного переувлажнения и низких годовых температур, причем доля торфяных и торфянистых почв возрас-

тает при повышении широтности [1]. Это существенно влияет на состав водотоков, поскольку общеизвестно, что органическое вещество поступает в водоемы в растворенном и взвешенном виде, причем 60–80 % его поступает в растворенном виде с почвенными стоками [6].

Вместе с тем состав и свойства (и, в частности, содержание и состав органического вещества) природных матриц торфяно-болотных экосистем, функционирующих в условиях западного сегмента Севера России, остались без должного рассмотрения. Имеющиеся в научной литературе данные по составу органического вещества подобных систем относятся преимущественно к районам с умеренно континентальным, переходным к южному, южным климатом [2, 3].

Поэтому представляется актуальным получить информацию о влиянии гео-климатических условий на состав и особенности переноса органического вещества водно-болотных экосистем.

Материалы и методы исследования

На водосборах Европейского Севера РФ превалируют верховые болота и торфяные залежи [1]. Поэтому в качестве объекта исследования выбран торф Иласского болотного массива, грядово-мочажинный и озерковый комплексы которого относятся к верховому типу и где расположен болотный стационар Росгидромета (образец 1), а также имеется участок, осушенный около 70 лет назад (образец 2). В качестве образцов сравнения использованы образцы торфа из регионов с умеренно континентальным и континентальным климатом: Республика Беларусь (образец 4) и Западная Сибирь (образец 3).

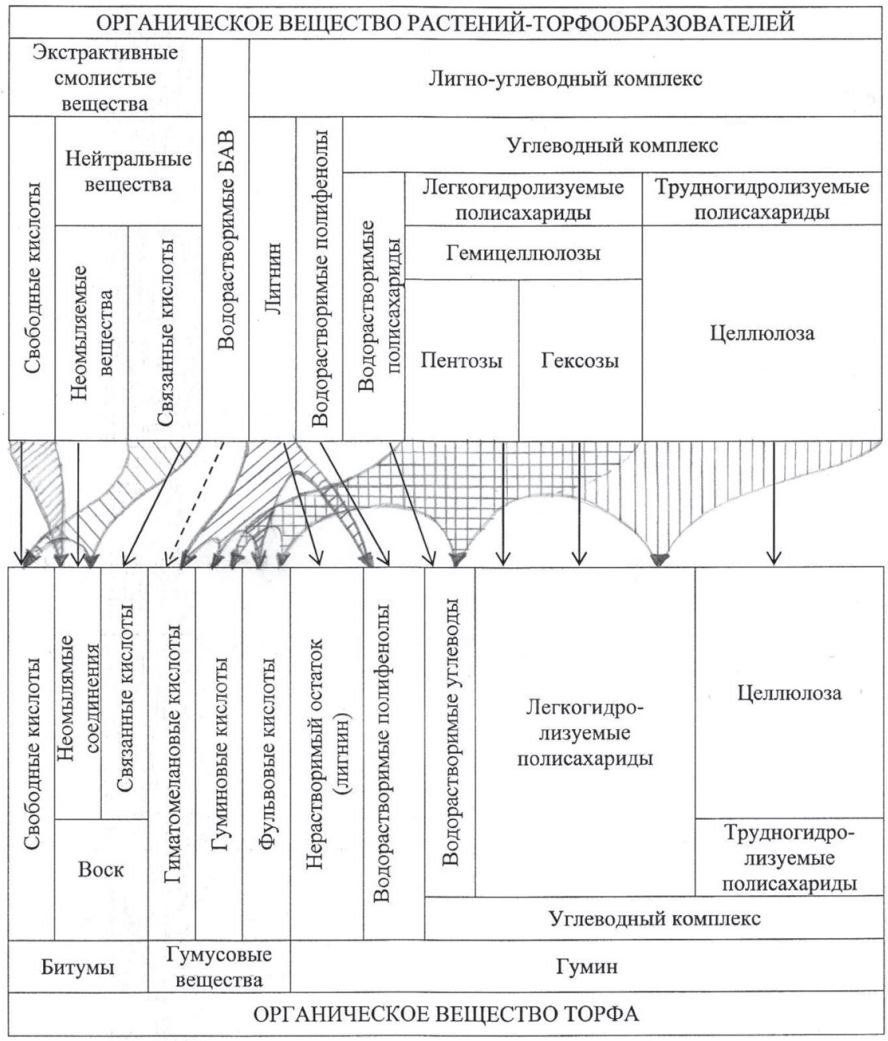


Рис. 1. Схема трансформации органического вещества в процессе торфообразования

Характеристика образцов верхового торфа

Показатель	Номер образца			
	1	2*	3	4
Климат	Субарктический морской		Умеренно континентальный	Континентальный
Координаты точки отбора	64°19′ N, 40°36′ E	64°19′ N, 40°41′ E	57°34′ N, 75°40′ E	54°19′ N, 29°08′ E
Глубина отбора, см	20–70	30–70	20–70	20–70
Степень разложения, %	5–10	10–15	20–25	15–20
Насыпная плотность, кг/м^3	71 ± 0,5	89 ± 0,5	520 ± 2	290 ± 1
Зольность, %	1,0 ± 0,2	5,7 ± 0,2	9,3 ± 0,2	5,1 ± 0,2
Массовая доля, % от органических веществ				
Битумы	5,4 ± 0,1	3,5 ± 0,1	5,1 ± 0,1	4,5 ± 0,1
Водорастворимые вещества	3,5 ± 0,2	4,4 ± 0,3	1,4 ± 0,1	0,4 ± 0,05
Легкогидролизуемые соединения	67,9 ± 0,1	46,8 ± 0,8	35,7 ± 0,8	16,1 ± 0,2
Трудногидролизуемые соединения	10,2 ± 0,1			4,7 ± 0,1
Негидролизуемый остаток	16,6 ± 0,3	24,8 ± 0,7	25,8 ± 0,4	30,4 ± 0,5
Гуминовые вещества	11,6 ± 0,2	20,5 ± 0,8	32,0 ± 0,9	43,9 ± 1,2
Соотношение ФК/ГК**	3,5	4,2	1,8	3,1

Примечания: * – образец с осушенного участка Иласского болотного массива, ** – соотношение массовых долей фульвовых кислот и гуминовых кислот.

Макрокомпонентный состав торфяных природных матриц исследовали согласно оптимизированныому методу изучения группового химического состава торфяных полимерных матриц, сформированных в условиях западного сегмента Севера России, подробно рассмотренному в [5]. Степень разложения, зольность, насыпную плотность определяли в соответствии с рекомендациями в [3]. Поверхностно-активные свойства характеризовали по снижению поверхностного натяжения водных растворов, измеренному методом Вильгельми, позволяющему изучать кинетику формирования поверхностного адсорбционного слоя в растворах природных полиэлектролитов [4] и отличающемуся высокой точностью и воспроизводимостью результатов. Снимки временных водных препаратов образцов торфа получали при помощи лабораторного микроскопа Axio Scope A1 Zeiss в комплекте с цифровой камерой Canon G10. Спектры растворов записывались в диапазоне длин волн от 190 до 900 нм на УФ-спектрофотометре (Shimadzu UV-1800) относительно растворителя. Гидродинамические размеры макромолекул определяли методом динамического светорассеяния в водных растворах гумусовых биополимеров, выделенных из исследуемых образцов торфа. Для анализа использовали измеритель размеров частиц Horiba-LB 550 (Франция) с диапазоном измерения частиц от 1,0 до 6000 нм.

Результаты исследования и их обсуждение

Торфообразование включает в себя множество разнонаправленных процессов, основными из которых принято считать окисление, гидролиз, деполимеризацию, конденсацию. Часть соединений, вследствие специфических угнетающих микробиоту условий, сохраняется в неизмененном виде и наследуется непосредственно от исходных растений-торфообразователей. Видоизмененность исходных структурных элементов характеризуется степенью разложения торфа. Она закономерно определяется продолжительностью и условиями трансформации растительных веществ и их производных. При этом, как видно из схемы на рис. 1, из высокомолекулярных составляющих образуются наряду с водорастворимыми и соединения, способные переходить в раствор при изменении pH среды.

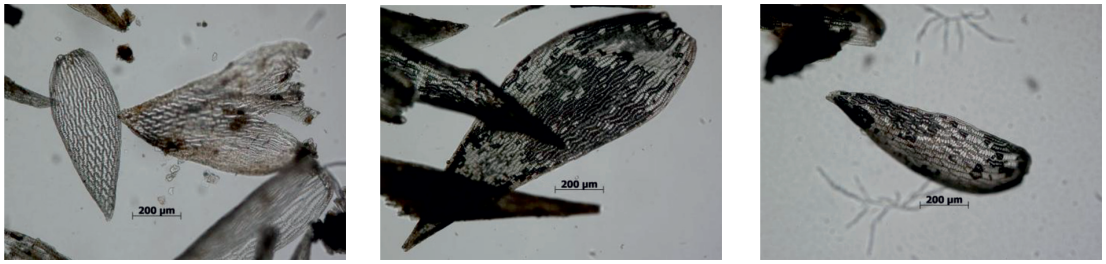
По данным, представленным в таблице, отчетливо прослеживается снижение степени разложения с повышением широтности (образцы 1, 3 и 4), что сопровождается уменьшением доли как конденсированной, так и гумифицированной части полимерной матрицы торфа. Аналогичное действие оказывает осушение территорий (образец 2), обеспечивающее лучшую аэрацию торфогенного слоя.

Как видно из данных таблицы, повышение широтности приводит, наряду со снижением степени разложения торфа, к уменьшению содержания гуминовых веществ и доли низкомолекулярной части (фульвокислот) в них, что вполне логично, учитывая сдерживающее влияние низких среднегодовых температур на процессы биотрансформации органической части исходных растений. Вместе с тем следу-

ет отметить низкую зольность и близкую по величине к характерным для верхового торфа других регионов битуминозность. Это также может ингибировать процессы разложения растительных остатков. Принято считать, что биосинтез составляющей основу торфяных битумов экстрактивной части в растениях наиболее чувствителен к природным условиям и в условиях Севера протекает значительно медленнее, чем в регионах с более теплым климатом. По-видимому, существенный вклад привносит низкая скорость разложения растительных экстрактивных веществ в холодных климатических условиях. Дополнительным подтверждением этого предположения служит снижение битуминозности в 1,5 раза в результате осушения торфяной залежи.

Очень малая величина насыпной плотности (а следовательно, высокая пористость) позволяет ожидать высокой сорбционной способности этих матриц по отношению к различным веществам природного и техногенного происхождения, что требует, однако, дополнительных исследований. Вместе с тем данная особенность способна заметно влиять на перенос веществ в болотно-водных экосистемах.

содержание гидролизуемых соединений и фульвокислот составляет около 80% от массы органического вещества, причем доля углеводов в них (включая трудногидролизуемые соединения, т.е. целлюлозу) в 2–3 раза ниже, чем в исследованных образцах торфа других регионов. Вместе с тем общеизвестно, что именно углеводная часть наиболее доступна для питания микробиоты. По-видимому, в условиях субаркического климата микробные сообщества менее активны, чем в других, более теплых условиях. Интересен также тот факт, что гуминовые соединения на 80% состоят из фракции с низкой молекулярной массой и, соответственно, с лучшей растворимостью в водных средах – фульвовых кислот. Следует отметить достаточно высокую поверхностную активность гуминовых веществ. Как свидетельствуют изотермы, представленные на рис. 3, по способности снижать поверхностное натяжение воды они близки к классическим поверхностно-активным веществам с тем отличием, что для достижения равновесия в описываемых системах ввиду высокой молекулярной массы гуминовых веществ требуется до 20–24 часов. Это неизбежно сказывается на переносе



а) *б)* *в)*

Рис. 2. Микрофотоснимки образцов торфа ненарушенного участка Иласского болотного массива с глубины залегания: а) 5 см; б) 50 см; в) 190 см

Следует отметить, что для торфа ненарушенного участка Иласского болотного массива низкая степень разложения характерна на всей исследованной глубине залегания (до 2 м). Это наглядно демонстрируют микрофотоснимки, представленные на рис. 2.

При сравнительном анализе представленного в таблице состава органической части в зависимости от региона формирования обращает на себя внимание высокое содержание в торфе Иласского болотного массива групп соединений потенциально растворимых в водных средах. Общее

органических веществ в виде взвеси в водных экосистемах.

При этом следует учитывать, что поверхностная активность относительно низкомолекулярной фульвокислотной фракции (максимальная депрессия поверхностного натяжения воды 19 мДж/м^2) заметно ниже, чем высокомолекулярной (максимальная депрессия поверхностного натяжения воды 32 мДж/м^2). И хотя поверхностная активность смеси обусловлена в большей степени высокомолекулярной составляющей, однако фракционный состав, бесспорно, будет влиять на поверхностно-активные свойства,

которые, в свою очередь, определяют устойчивость взвеси в водоемах. Спектральный анализ экстрактов позволяет констатировать, что и водорастворимая часть торфа Иласского болотного массива представлена преимущественно полифенолами, близкими по структуре к гуминовым соединениям, тогда как в торфе других регионов исследователи при экстракции холодной водой извлекают в основном углеводы [2, 3]. Необходимо отметить, что поверхностная активность гуминовых веществ проявляется также в способности образовывать в растворах межмолекулярные агрегаты размером от 100 до 1000 нм.

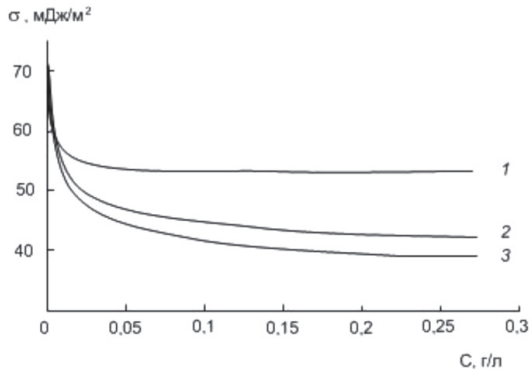


Рис. 3. Концентрационные зависимости поверхностного натяжения растворов: 1 – фульвовых кислот, 2 – гуминовых веществ; 3 – гуминовых кислот

Таким образом, выявлено существенное отличие процессов биодеградации органического вещества природных матриц в условиях холодного климата, в частности зафиксировано снижение глубины биотрансформации как высокомолекулярных компонентов клеточной стенки исходных растений, так и экстрактивных веществ. Вместе с тем освоение заболоченных территорий неизбежно приведет к активации биодеструкции законсервированного органического вещества торфа и выносу его в водоемы. Детальное описание этих процессов требует проведения углубленного исследования влияния гео-климатических условий западного сегмента Севера России на перенос веществ и протекание биогеохимических процессов в сопряжении с анализом органического вещества почв, воды и донных осадков.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта фундаментальных исследований УрО РАН № 0410-2015-0031, образцы торфа получены в рамках темы ФАНО России № 0410-2014-0029 и гранта РФФИ №14-05-90011-Бел_а.

Авторы выражают благодарность сотруднику ФГБУН ФИЦКИА РАН Сурсо М.В. за помощь в получении микрофотоснимков препаратов торфа.

Список литературы

1. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0 // Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии. – М., 2014. – С. 768.

2. Торф (ресурсы, технологии, геоэкология) / В.И. Косов, А.С. Беляков, О.В. Белозеров, Д.Ю. Гогин. – Санкт-Петербург: Наука, 2007. – 452 с.

3. Лиштван И.И., Король Н.Т. Основные свойства торфа и методы их определения. – Минск, 1976. – 320 с.

4. Селянина С.Б., Труфанова М.В., Афанасьев Н.И., Селиванова Н.В. Поверхностно-активные свойства сульфатных лигнинов // ЖПХ. – С-Пб., 2007. – Т. 80, № 11. – С. 1807–1810.

5. Зависимость состава и свойств групповых составляющих торфа от схемы их разделения / О.Н. Ярыгина, Т.И. Пономарева, М.В. Труфанова, С.Б. Селянина, Л.Н. Парфенова и др. // Природопользование. – 2015. – № 28. – С. 211–216.

6. Cole J.J., Kritzberg E.S., Pace M.L., Granéli W. Bacterial growth on allochthonous carbon in humic and nutrient enriched lakes: Results from whole lake experiments // Ecosystems. – 2006 – V. 9. – P. 489–499.

7. Projections of Future Climate Change / U. Cubasch G.A. Meehl, G.J. Boer, R.J. Stouffer, M. Dix, A. Noda, C.A. Senior, S.C.B. Raper and K.S. Yap // Climate Change 2001: The Scientific Basis: Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – 2001. – P. 526–582.

8. Walter B.P., Heimann M., Matthews E. Modeling modern methane emissions from natural wetlands 1. Model description and results // Journal of Geophysical Research-Atmospheres. – 2001. – № D24. – P. 34189–34206.