УДК 556.565

DOI:10.35567/1999-4508-2017-1-2

МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ ГУМИНОВЫХ ВЕЩЕСТВ В ВОДАХ ОСУШЕННОГО ВЕРХОВОГО БОЛОТА В ЗАПАДНОЙ СИБИРИ*

© 2017 г. Ю.А. Харанжевская^{1,2}, Е.С. Иванова¹, Е.С. Воистинова¹¹ ФГБНУ «Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа» – филиал СФНЦА РАН, г. Томск, Россия² ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск, Россия

Ключевые слова: болотные воды, гуминовые вещества, гидролесомелиорация, спектральный анализ, факторный анализ, качество вод, Васюганское болото, Западная Сибирь.

Представлен анализ многолетней динамики содержания гуминовых веществ в болотных водах участка лесомелиорации, выполнены спектральный, корреляционный и факторный анализы.

Ю.А. Харанжевская Е.С. Иванова Е.С. Воистинова

Исследования показали цикличность продолжительностью 2–4 года в изменении содержания гуминовых веществ в болотных водах верхового осушенного болота, а также статистически значимую тенденцию снижения концентраций гуминовых кислот за многолетний период. В сезонной динамике отмечено закономерное увеличение содержания гуминовых веществ в болотных водах в середине периода вегетации (июль-август). Корреляционный анализ позволил установить зависимость между количеством гуминовых кислот и окислительно-восстановительным потенциалом торфяной залежи. Отмечена в отдельные годы связь содержания гуминовых веществ в воде с уровнями болотных вод, влажностью торфа, температурой торфяной залежи, температурой воздуха и атмосферными осадками. При этом лимитирующим фактором, определяющим количество гуминовых кислот в болотных водах, является температурный режим, а фульвокислот – степень влагосодержания торфяной залежи болот.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-00187 –мол_а

Показано, что в результате осушения верхового болота произошло увеличение интенсивности трансформации растительных остатков и органического вещества торфа и повышение концентрации гуминовых веществ в болотных водах (гуминовых кислот – на 14, фульвокислот – на 18 %) в сравнении с фоновыми верховыми болотами региона. Поэтому хозяйственное использование торфяных болот, повышение температуры воздуха и количества атмосферных осадков при изменении климата будут способствовать увеличению содержания органических веществ как в болотных водах, так, вероятно, и в подземных и речных водах региона. В условиях естественного восстановления осушенных болот в перспективе возможно снижение концентраций гуминовых веществ в болотных водах и водах рек-водоприемников.

Актуальность изучения экологического состояния болот Западной Сибири и особенностей химического состава их вод в значительной степени обусловлена усилением техногенного воздействия при хозяйственном освоении территории и развитии нефтегазодобывающего комплекса. В условиях высокой заболоченности территории добыча нефти и газа, строительство дорог и линий высоковольтных электропередач, осушение болот, разработка торфяных месторождений, торфяные пожары вызывают существенные изменения и деградацию болот, что оказывает негативное влияние на состав болотных вод и рек-водоприемников. За последние десятилетия многие осушенные болота в Западной Сибири практически не используются, что приводит к существенным изменениям их водного и теплового режимов. На некоторых осушенных болотных массивах наблюдается процесс естественного восстановления, что приводит к подтоплению прилегающих территорий и активному поступлению органических веществ в природные воды, формированию неблагоприятных условий для хозяйственной деятельности. На других – происходят активизация процессов трансформации растительных остатков и деградация торфяной залежи, вызывающие увеличение эмиссии парниковых газов, что приводит к возникновению пожароопасной обстановки, значительному повышению концентраций органических веществ в болотных и речных водах и превышению установленных норм предельно допустимых концентраций. Кроме того, в условиях отмеченных тенденций увеличения температуры воздуха и атмосферных осадков на данной территории [1, 2] в перспективе, вероятно, стоит ожидать увеличения содержания органических веществ в природных водах района исследований. Все это определяет негативную экологическую ситуацию в регионе и требует детальных исследований.

В настоящее время данные по содержанию гуминовых веществ в болотных водах представлены в работах ряда авторов [3–13], проведены предварительные исследования многолетней динамики содержания гу-

миновых веществ в водах низинного болота на террасе р. Бакчар [14]. Однако, несмотря на большое разнообразие материалов и проведенных исследований, не в полном объеме изучены условия, определяющие высокие концентрации гуминовых веществ в болотных водах, их миграцию и пространственно-временную динамику на уровне конкретного болотного массива. В представленной работе проведены исследования в данном направлении и дана оценка многолетней динамики органических веществ в болотных водах верхового осушенного болота. Выполнен также подробный анализ условий и факторов, определяющих их содержание в водах в условиях интенсивного хозяйственного использования территории и в зависимости от основных показателей природных процессов функционирования болот: влажности торфа, температуры залежи, уровней болотных вод и окислительно-восстановительного потенциала, количества атмосферных осадков, температуры воздуха.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили на участке осушенного сосново-кустарничково-сфагнового верхового болота, расположенного в междуречье рек Бакчар и Икса, являющегося частью Васюганской болотной системы. Объект исследований общей площадью 4000 га осушен в 1973–1979 гг. с целью лесомелиорации. Для отбора проб болотных вод выбран участок в пределах осушительной системы (точка 1) и аналогичный ему участок (точка 2), расположенный за пределами осушительной системы на расстоянии 500 м от осушительного канала, испытывающий влияние осушения (рис. 1). Мощность торфяной залежи в пределах точек отбора проб составляет 2,25 м (точка 1) и 2,50 м (точка 2). Залежь до 1,5 м сложена фускум торфом на обоих участках, затем в торфе начинают преобладать сфагнум ангустифолиум и магелланикум, ниже вид торфа меняется на сосново-сфагновый, осоковый, который переходит в древесно-осоковый [15]. Проведенные ранее исследования показали, что осушение положительно сказалось на росте древесно-кустарничкового яруса, в особенности на увеличении высоты подроста сосны и обилии кустарничков, составе мхов, сформировавших за период осушения верхние слои торфа, что проявилось в кратном снижении доли *S. magellanicum* в торфе. Однако в настоящее время в связи с неудовлетворительной работой осушительной сети происходит интенсивное восстановление болота, выражающееся в появлении крупных кочек, образованных травяной растительностью в результате повышения уровня болотных вод, а также изменении состава современного фитоценоза [16].

Методика исследований включала анализ многолетней динамики содержания гуминовых веществ в водах осушенного верхового болота в зависимости от основных показателей природных процессов функционирования

(температура воздуха, атмосферные осадки, влажность торфа, температура залежи, уровни болотных вод, окислительно-восстановительный потенциал). Для определения содержания органических веществ проводили отбор проб воды из специально подготовленной скважины глубиной 1 м в торфяной залежи болота. Определение гуминовых веществ выполняли в аккредитованном Лабораторно-аналитическом центре СибНИИСХиТ в соответствии с методикой [17]. Для оценки влияния на содержание органических веществ в болотных водах процессов, происходящих в торфяной залежи, наблюдали за окислительно-восстановительным потенциалом (ОВП) и температурным режимом торфяной залежи с помощью стационарно установленных датчиков [18]. Отбор образцов торфа на влажность производили в бьюксы по всей глубине торфяной залежи согласно ГОСТ 11305-65. Гидрологические наблюдения на болотах выполнены в соответствии с [19]. Наблюдения за процессами ОВП, температурой торфяной залежи, влажностью, отбор образцов на химический анализ и определение гуминовых веществ в болотных водах проводили с периодичностью 1 раз в месяц с мая по сентябрь 2000–2011 гг. В работе также использовали данные Росгидромета по температуре воздуха и количеству атмосферных осадков по метеостанции у с. Бакчар. Для оценки увеличения количества гуминовых веществ в болотных водах осушенного болота проводилось сравнение с фоновым естественным участком верхового сосново-кустарничково-сфагнового болота в бассейне р. Ключ (точка 3, рис. 1).

Методика статистического анализа данных включала проверку рядов на соответствие генеральной совокупности с применением параметрических и непараметрических критериев (Стьюдента, Фишера, Манна–Уитни), оценку закономерностей сезонных и многолетних изменений содержания гуминовых веществ в болотных водах, корреляционный, регрессионный, спектральный и факторный анализы.

Анализ закономерностей сезонных изменений компонентов химического состава болотных вод проводили с применением методики спектрального анализа путем построения сезонной волны и расчетом индексов сезонности I

$$I = \frac{X_i}{X_n} 100 \%, \quad (1)$$

где X_i – концентрация компонента за i месяц, осредненная за многолетний период (2006–2012 гг.), мг/л;

X_n – среднемноголетняя концентрация компонента, мг/л [20].

Оценку статистически значимых тенденций изменения содержания гуминовых веществ в болотных водах за многолетний период выполняли с использованием критерия Питмена.

Рис. 1. Схема расположения объектов исследования: 1 – осушенный участок сосново-кустарничково-сфагнового верхового болота на междуречье рек Бакчар и Икса (точка 1); 2 – естественный участок сосново-кустарничково-сфагнового верхового болота на междуречье рек Бакчар и Икса за пределами осушительной сети (точка 2); 3 – фоновый участок, сосново-кустарничково-сфагнового верхового болота в бассейне р. Ключ (точка 3).

Спектральный анализ (полное разложение Фурье) временных рядов химического состава болотных вод основывался на представлении о том, что сезонные колебания представляют собой сумму нескольких синусоидальных и косинусоидальных гармоник с различными периодами, при этом оценивался вклад каждой гармоники в общую дисперсию ряда [21, 22]. Дисперсия C_i за счет i гармоники определялась по зависимости

$$C_i = \sqrt{A_i^2 + B_i^2}, \quad (2)$$

где A и B – коэффициенты регрессии, показывающие степень корреляции функций косинусов (A) и синусов (B) с данными на соответствующих частотах. Дисперсия для всех гармоник равна $C_i^2/2$, за исключением последней, для которой эта дисперсия равна C_i^2 .

Факторный анализ проводили с использованием метода главных компонент, основанного на вычислении векторов и собственных значений ковариационной матрицы исходных данных и выполненного с построением графика «каменистой осыпи» для определения ведущих факторов и оценки матрицы факторных нагрузок.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Торфяная залежь болот является достаточно мобильной системой и процессы трансформации органического вещества торфов весьма быстро реагируют на изменения условий аэрации за сравнительно короткий период [23]. Осушение приводит к практически необратимым изменениям в торфяной залежи болот. Сброс воды лишает торфяной профиль поддерживающего водного скелета, что зачастую ведет к их механической усадке и уплотнению. Активизируется также процесс биохимического разложения органического вещества торфов. Темпы биохимического разложения органического вещества торфов различны и определяются многими факторами: интенсивностью дренажа и глубиной залегания грунтовых вод, динамикой уровней болотных вод, влажностью торфяной залежи, внешним и внутренним температурным режимом, окислительно-восстановительным потенциалом [24]. Поэтому, на наш взгляд, содержание гуминовых веществ в болотных водах является одним из важных показателей интенсивности трансформации торфяной залежи болот под влиянием осушения при хозяйственном использовании и изменении климата.

Исследования содержания гуминовых веществ в болотных водах проводились за период наблюдений 2000–2011 гг. В целом данный период включает весьма контрастные по степени увлажненности и теплообеспеченности годы. Так, выделяются влажные 2001, 2002, 2004, 2009 и 2011 гг. (сумма осадков за год составила 501–626 мм), умеренно-влажные 2000, 2007, 2008 и 2010, сухие – 2003, 2005 и 2006 (сумма осадков за этот период составила 304–428 мм) (таблица). Колебания влажности торфяной залежи в слое 0–100 см отмечены в пределах от 87 до 95 %, сезонная изменчивость составляет 1–3 %. Выявлена более высокая (на 2–3 %) влажность торфяной залежи участка (точка 1) в сравнении с естественным участком исследования за пределами осушительной сети (точка 2). В результате сложившихся климатических условий амплитуда колебаний уровней болотных вод за исследуемый период достигла 82 см на точке 1 и 66 см на точке 2. На осушенном участке (точка 1) зафиксированы более низкие многолетние среднесезонные уровни болотных вод (на 1,0–6,3 см) в сравнении с естественным участком (точка 2) наблюдения.

Таблица. Годовая сумма осадков и положительных температур по данным метеостанции у с. Бакчар

Показатель	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Сумма осадков, мм	448	580	586	385	446	304	428	501	457	626	491	527
Сумма положительных температур, °С	1953	2050	1923	2094	2058	1897	1800	1762	1828	1678	1742	1728

В последнее время отмечается тенденция увеличения уровней болотных вод в пределах осушенного пункта за счет зарастания осушительных каналов и естественного восстановления болота. Объективным условием, благоприятствующим процессам образования и разложения торфа, является температура воздуха. Среднегодовая температура в данном районе за период исследований в основном отрицательная. За 11 лет наиболее теплообеспеченными являются 2001, 2003 и 2004 гг., среднегодовая температура воздуха составила 0,95–1,74 °С, а сумма положительных температур 2050–2094 °С. В среднем за период исследований температура торфяной залежи в слое 0–100 см составила на точке 1,0–9,39 °С, на точке 2,0–8,62 °С. Амплитуда колебания температуры торфяной залежи от года к году составляет 3,3 °С (точка 1) и 5,7 °С (точка 2). В режиме интенсивного осушения низкая влажность торфа способствует формированию агрессивной окислительной среды (ОВП > 600 мВ), окислительно-восстановительный потенциал осушенного и естественного участков изменялся соответственно от +42,4 до +807,4 мВ (точка 1) и от +17,4 до +815,5 мВ (точка 2). В торфяной залежи на обоих участках отмечено снижение ОВП с глубиной и появление восстановительных условий. Граница смены окислительных процессов на восстановительные по сезону неоднозначна, в среднем наблюдается на глубине 30–50 см (точка 1), 70–90 см (точка 2).

В данных природно-климатических условиях формируется особый тип природных вод – болотные воды с высоким содержанием органических веществ, ионов аммония и железа. Проведенные исследования показали, что в целом болотные воды исследуемой территории характеризуются более высокими концентрациями фульвокислот – ФК (от 5,49 до 156 мг/л) и небольшими концентрациями гуминовых кислот – ГК (от 2,44 до 25,8 мг/л) (рис. 2, 3).

Статистически значимых различий между концентрациями гуминовых веществ в болотных водах исследуемых участков не обнаружено. Содержание гуминовых кислот различается незначительно и в среднем составляет $8,32 \pm 4,76$ мг/л (точка 1) и $7,77 \pm 4,07$ мг/л (точка 2). В сезонной динамике в болотных водах осушенного участка (точка 1), как правило, наблюдаются более высокие (на 31–42 %) концентрации гуминовых кислот в сравнении с естественным участком (точка 2), расположенном на расстоянии 500 м от осушительной системы. В течение вегетационного сезона концентрации гуминовых кислот изменяются в значительных пределах, коэффициент вариации на осушенном участке (точка 1) составил 0,57, естественном участке (точка 2) – 0,52. Содержание фульвокислот менее вариабельно: коэффициенты вариации на осушенном участке (точка 1) – 0,33, на естественном участке (точка 2) – 0,38.

Рис. 2. Изменение содержания гуминовых веществ в водах осушенного участка (точка 1) за период 2000–2011 гг.

Рис. 3. Изменение содержания гуминовых веществ в водах естественного участка (точка 2) за период 2000–2011 гг.

Среднеголетние значения концентрации фульвокислот в болотных водах за вегетационный период практически не различаются между участками: $69,2 \pm 23,1$ мг/л (осушенный участок) и $69,0 \pm 26,4$ мг/л (естественный участок). Следует отметить, что статистический анализ с применением критериев Стьюдента, Фишера и Манна–Уитни показал достоверные различия в содержании гуминовых веществ в водах исследуемого осушенного верхового болота в сравнении с фоновым участком верхового сосново-кустарничково-сфагнового болота в бассейне р. Ключ. Сравнительный

анализ выявил более высокое содержание гуминовых кислот (на 14 %) и фульвокислот (на 18 %) в болотных водах исследуемого осушенного болота в сравнении с естественным болотным массивом. Поэтому можно сделать вывод, что осушение и хозяйственное использование торфяных болот способствует увеличению содержания органических веществ в болотных водах, а также, вероятно, в подземных и речных водах региона, как это было отмечено в исследованиях А.М. Плюснина и Д.И. Жамбаловой [7].

Сезонная динамика содержания гуминовых и фульвокислот в болотных водах в пределах участков отбора проб в целом весьма схожая. Анализ индексов сезонности позволил отметить формирование максимумов сезонной волны содержания гуминовых и фульвокислот в болотных вод ($I = 126\text{--}130\%$) в наиболее теплообеспеченный период года (июль-август) (рис. 4). Сравнение полученных результатов с опубликованными [6, 9] показало, в целом, сходные тенденции сезонного изменения концентрации гуминовых веществ в болотных водах. Однако отмечены и некоторые отличия, вероятно, связанные с влиянием осушения, т. к. в пределах естественного болота в бассейне р. Ключ [6] наблюдается увеличение содержания гуминовых веществ летом (июль), а также в осенний период (сентябрь).

Средние концентрации гуминовых кислот и фульвокислот за период наблюдений изменяются циклично, и, в целом, в пределах исследуемого участка можно выделить циклы продолжительностью 2–4 года. Спектральный анализ (полное разложение Фурье) временного ряда показал, что в число первых четырех гармоник ряда гуминовых кислот осушенного участка (точка 1) входят периоды 12, 6, 4, 2 месяцев, описание дисперсии ряда составляет 81 %; естественного участка (точка 2) – 12, 6, 4, 2 месяцев, описание дисперсии ряда 60 %; для ряда фульвокислот осушенного участка (точка 1) входят периоды 9, 21, 5, 2 месяцев, описание дисперсии ряда составляет 65 %; фульвокислот естественного участка (точка 2) – 21, 9, 5, 2 месяцев, описание дисперсии ряда 71 %.

Первая гармоника временного ряда гуминовых кислот включает период продолжительностью 12 месяцев и обусловлена возрастанием активных температур воздуха до величин 1800–2094 °С, для фульвокислот охватывает период продолжительностью 21 месяц, который определяется наступлением влажных и умеренно-влажных лет (2002, 2009–2011 гг.), характеризующихся возрастанием количества атмосферных осадков до 586–626 мм. Вторая гармоника временного ряда гуминовых кислот представляет период продолжительностью 6 месяцев и связана с закономерным снижением суммы активных температур выше 10 °С в конце вегетационного периода в согласии с повышением уровня болотных вод при выпадении осенних дождей, затуханием процессов трансформации растительных остатков;

для фульвокислот – охватывает период продолжительностью 9 месяцев и определяется наступлением благоприятных тепло- и влагообеспеченных периодов с частотой 1 раз в два года. Третья гармоника временного ряда гуминовых веществ включает период продолжительностью 4–5 месяцев и связана с активизацией процессов разложения растительных остатков верхнего слоя торфяной залежи в середине периода вегетации. Четвертая гармоника включает периоды в два месяца, обусловлена началом вегетации и связана с устойчивым повышением температуры воздуха в весенне-летний период, снижением уровней болотных вод и активизацией процессов обмена веществ.

В ходе исследований отмечено, что максимум содержания гуминовых кислот (25,8 мг/л) на осушенном участке (точка 1) зафиксирован в июле 2005 г., когда наблюдалось умеренное количество осадков и средние температуры воздуха. Высокие концентрации гуминовых кислот (21,8 мг/л) в водах естественного участка (точка 2) наблюдения получены в августе 2003 г. при значительном (до 37 см) снижении уровней болотных вод. Максимальное содержание фульвокислот наблюдалось в сентябре 2008 г. как на естественном (156 мг/л), так и на осушенном (137 мг/л) участках.

Анализ многолетней динамики содержания органических веществ в болотных водах верхового осушенного болота выявил тенденцию снижения концентраций гуминовых и фульвокислот в болотных водах осушенного верхового болота, при этом статистически значимая тенденция, связанная с уменьшением содержания гуминовых кислот в болотных водах, характерна для естественного участка (точка 2), что, вероятно, определяется процессами восстановления болота, а также региональными закономерностями изменения температуры воздуха и количества атмосферных осадков.

Для анализа многолетней динамики содержания гуминовых веществ в болотных водах и прогноза возможных будущих тенденций увеличения их концентраций в условиях изменения климата был проведен корреляционный и факторный анализы. Корреляционный анализ показал отсутствие однозначных зависимостей, коэффициенты корреляции не только отличаются по величине, но и имеют разный знак в различные по степени увлажненности и теплообеспеченности годы. Известно, что температура воздуха влияет на интенсивность процессов трансформации растительных остатков, в значительной степени определяя содержание в болотных водах гуминовых веществ. Проведенный анализ выявил высокую корреляционную зависимость между содержанием гуминовых кислот в болотных водах и среднесезонной (май–сентябрь) температурой воздуха ($r = 0,65–0,90$). Как правило, в условиях более низких уровней болотных вод на осушенном участке (точка 1) отмечаются более высокие коэффициенты корреляции (рис. 5).

Исследования позволили выявить в отдельные годы тесную связь между содержанием в болотных водах гуминовых и фульвокислот и температурой торфяной залежи, что подтверждает выводы, сделанные в работе [12] о том, что температура торфяной залежи является наиболее важным фактором, определяющим содержание гуминовых веществ в болотных водах. Согласно проведенным в рамках данной работы исследованиям, при прогревании торфяного профиля на 2°C на осушенном участке концентрации гуминовых кислот в воде увеличиваются в 1,29 раз. В большей степени температура торфяной залежи оказывает влияние на содержание в водах гуминовых кислот ($r = 0,66–0,85$). Корреляция между содержанием фульвокислот в болотных водах и температурой торфяной залежи относительно высокая, но в основном отрицательная.

Исследования выявили зависимость между суммой атмосферных осадков и содержанием гуминовых веществ в водах, которая в основном достаточно тесная для всего осушенного болота, но противоположная для осушенного (точка 1) и естественного (точка 2) участков отбора проб. В водах естественного участка, как правило, поступление атмосферных осадков приводит к снижению их концентрации при разбавлении (коэффициент корреляции в основном отрицательный, $r = -0,67–0,83$), а в водах осушенного участка – преимущественно к увеличению содержания гуминовых веществ (коэффициент корреляции положительный, $r = 0,64–0,80$). При этом отмечено увеличение концентраций фульвокислот и гуминовых кислот в водах исследуемого болота в периоды высокой водности, следующие за теплообеспеченными сезонами года. Достаточно тесная корреляционная связь в отдельные годы, также как и в работах [11, 25], отмечена между концентрацией фульвокислот в болотных водах и уровнями болотных вод

Рис. 5. Содержание гуминовых кислот в болотных водах осушенного участка в зависимости от температуры воздуха и торфяной залежи (R^2 – коэффициент детерминации).

(коэффициент корреляции $r = -0,73$ и $r = -0,87$). Увеличение концентрации растворенных органических веществ в периоды повышения уровней болотных вод также получено рядом зарубежных исследователей [26], в т. ч. при проведении лабораторных экспериментов по оценке влияния изменений условий окружающей среды на их содержание [11]. В данных исследованиях наиболее высокая корреляция фульвокислот с уровнями болотных вод наблюдается в маловодные годы, тогда как в остальные периоды коэффициент корреляции либо меняет знак, либо эта связь ослабевает (рис. 6).

Корреляционный анализ показал, что влажность торфа влияет на содержание гуминовых веществ преимущественно в средние по влагообеспеченности годы (рис. 7). Более тесная связь влажности торфа отмечена с концентрациями гуминовых кислот в воде (коэффициенты корреляции отрицательные и составляют $r = -0,74$ – $0,99$), что говорит об обратной зависимости.

Обращает внимание отсутствие резко восстановительных условий в торфяной залежи, тесная ($r = -0,72$ – $0,99$) корреляционная связь концентрации гуминовых кислот в болотных водах с окислительно-восстановительными условиями торфяной залежи и менее тесная с содержанием фульвокислот ($r = 0,64$). Согласно данным [11, 25], окислительно-восстановительный потенциал является показателем интенсивности биохимических реакций в торфе и играет важную роль уже после изменения условий увлажнения и температурного режима торфяной залежи.

Факторный анализ позволил выделить три основных фактора, которые на 68 % (точка 1) и на 72 % (точка 2) описывают изменчивость исходных данных (рис. 8). Для осушенного участка (точка 1) первая компонента отражает

Рис. 6. Содержание гуминовых веществ в болотных водах осушенного болота в зависимости от уровней болотных вод и месячной суммы атмосферных осадков по метеостанции у с. Бакчар (СПб – средняя поверхность болота).

Рис. 7. Содержание гуминовых веществ в болотных водах осушенного болота в зависимости от влажности и окислительно-восстановительного потенциала торфяной залежи.

изменения температурного режима болота, она определяет 27 % общей изменчивости, а высокие факторные нагрузки имеют температура торфяной залежи (0,80) и температура воздуха (0,74). Вторая компонента определяет 21 % общей дисперсии, определяющую роль играют количество атмосферных осадков (0,73) и собственно концентрации фульвокислот (0,66).

Третья компонента определяет 20 % общей изменчивости, а высокую нагрузку имеют концентрации гуминовых кислот (0,84), которые объединяются с уровнями болотных вод (–0,65) в один фактор, показывая, что осушение влияет на увеличение гуминовых кислот в болотных водах.

В пределах естественного участка (точка 2) первая компонента определяет 28 % дисперсии – ведущее влияние на фактор оказывают температура

торфяной залежи (0,76) и уровень болотных вод (0,63). Вторая компонента определяет 25 % общей изменчивости и имеет высокую факторную нагрузку температуры воздуха ($-0,67$), которая объединяется с концентрациями гуминовых кислот ($-0,70$) в единый фактор. Третья компонента определяет изменчивость процессов формирования состава болотных вод всего на 19 %, а наибольшую нагрузку имеют сумма атмосферных осадков ($-0,73$) и содержание в болотных водах фульвокислот ($-0,54$). Проведенный факторный анализ позволил подтвердить отмеченные выше закономерности корреляционного анализа, показав, что ведущим фактором, определяющим количество гуминовых кислот в болотных водах, является температурный режим, а фульвокислот – степень влагосодержания торфяной залежи болот.

Рис. 8. Факторный анализ формирования концентраций гуминовых веществ в болотных водах. Переменные, формирующие факторы: УБВ – уровень болотных вод, см; X осадки – суммарное количество атмосферных осадков за месяц, мм; Твозд – среднемесячная температура воздуха, °С; Ттз100 – средняя температура торфяной залежи в слое 0–100 см, °С.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы установлено, что торфяная залежь является многокомпонентной и достаточно мобильной системой и весьма быстро реагирует на изменение условий окружающей среды. Анализ многолетней динамики содержания гуминовых веществ в болотных водах верхового осушенного болота выявил некоторую цикличность изменения гуминовых и фульвокислот за исследуемый период, в целом в пределах исследуемого участка можно выделить циклы продолжительностью 2–4 года, которые согласуются с изменением суммы активных температур, что под-

тверждается результатами спектрального анализа. Анализ поведения временного ряда с помощью спектрального анализа (полного разложения Фурье) показал, что в число первых четырех гармоник ряда гуминовых кислот входят периоды 12, 6, 4, 2 месяца, фульвокислот – 21, 9, 5, 2 месяца, описание дисперсии ряда составило от 65 до 81 %.

Анализ многолетней динамики содержания органических веществ в болотных водах верхового осушенного болота показал снижение концентраций гуминовых и фульвокислот в болотных водах осушенного верхового болота, статистически значимая тенденция характерна только для концентраций гуминовых кислот естественного участка (точка 2). В сезонной динамике отмечено закономерное увеличение гуминовых веществ в болотных водах в наиболее теплообеспеченный период года (июль-август). Корреляционный анализ позволил установить четкую зависимость между количеством гуминовых кислот и окислительно-восстановительным потенциалом торфяной залежи: при переходе от окислительных к восстановительным условиям концентрация гуминовых кислот возрастает. Весьма тесная связь в отдельные годы отмечается между содержанием гуминовых веществ в воде и уровнями болотных вод, влажностью торфа, температурой торфяной залежи, температурой воздуха и атмосферными осадками, что в целом согласуется с опубликованными ранее данными [11, 12, 25] и др. При этом лимитирующим фактором, определяющим количество гуминовых кислот в болотных водах, является температурный режим, фульвокислот – степень влагосодержания торфяной залежи болот, что подтверждается проведенным факторным анализом с применением метода главных компонент. Фульвокислоты по сравнению с гуминовыми кислотами хорошо растворимы и легко мигрируют как в форме свободных кислот, так и в составе различных соединений. В засушливые периоды происходит образование и накопление гуминовых веществ в торфяной залежи болот, а поступление их в болотные воды осуществляется при выпадении атмосферных осадков и увеличении уровня болотных вод.

Отмечено, что процессы трансформации органического вещества торфа достаточно быстро реагируют на осушительные мероприятия вследствие изменений условий аэрации торфяной залежи за сравнительно короткий период. Поэтому в результате осушения верхового болота произошло увеличение интенсивности трансформации растительных остатков и органического вещества торфа и соответственное повышение концентрации гуминовых веществ в болотных водах. В сравнении с фоновым естественным участком верхового сосново-кустарничково-сфагнового болота в бассейне р. Ключ увеличение концентраций гуминовых кислот произошло на 14, фульвокислот – на 18 %. Таким образом, хозяйственное использование торфяных болот, по-

вышение температуры воздуха и количества атмосферных осадков при изменении климата будут способствовать увеличению содержания органических веществ в болотных водах, а также, вероятно, в подземных и речных водах региона. Однако болота, согласно [27], являются весьма устойчивыми природными образованиями, в настоящее время на исследуемом участке лесомелиорации отмечается процесс естественного восстановления при интенсивном зарастании осушительных каналов, что в перспективе будет способствовать снижению концентраций гуминовых веществ в болотных водах и водах рек-водоприемников. Поэтому мониторинг содержания гуминовых веществ в водах болот особенно важен в условиях природно-климатических изменений для сохранения качества вод в регионе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Комаров А.И., Кусков А.И.* Структура и динамика поля температуры в районе Большого Васюганского болота // Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2002. С. 111–122.
2. *Ромашова Т.В.* Климатические изменения на юге Томской области в глобальном контексте // Актуальные проблемы экологии и природопользования Сибири в глобальном аспекте. Томск. 2007. С. 334–337.
3. *Черняев А.М., Черняева Л.Е., Еремеева М.Н.* Гидрохимия болот. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 429 с.
4. *Шварцев С.Л., Рассказов Н.М., Сидоренко Т.Н., Здвижков М.А.* Геохимия природных вод района Большого Васюганского болота. Большое Васюганское болото // Современное состояние и процессы развития. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2002. С. 139–149.
5. *Савичев О.Г.* Химический состав болотных вод Томской области (Россия) в естественном и нарушенном состояниях // Торф в решении проблем энергетики, сельского хозяйства и экологии. Минск, 2006. С. 242–245.
6. *Инишева А.И., Юдина Н.В., Соколова И.В.* Динамика углеродсодержащих соединений в водах олиготрофного болота // Вестник ТГПУ. 2013. 8(136). С. 126–130.
7. *Плюснин А.М., Жамбалова Д.И.* Влияние мелиорации на экологическое состояние поверхностных и подземных вод Усть-Селегинской впадины // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геоэкология. 2013. № 5. С. 399–404.
8. *Marin L.E., Kratz T.K., Bowser C.J.* Spatial and temporal patterns in the hydrogeochemistry of a poor fen in northern Wisconsin, USA // Biogeochemistry. 1990. 11. P. 63–76.
9. *Moore T.R.* Patterns of dissolved organic matter in subarctic peatlands // Earth Surface Processes and Landforms. 1987. Vol. 12. Issue 4. July/August. P. 387–397.
10. *Strack M., Waddington J.M., Bourbonniere R.A., Buckton E.L., Shaw K., Whittington P., Price J.S.* Effect of water table drawdown on peatland dissolved organic carbon

- export and dynamics // *Hydrological Processes*. 2008. Vol. 22. Issue 17. August. P. 3373–3385.
11. *Clark J.M., Ashley D., Wagner M., Chapman P.J., Lane S.N., Evans C.D., Heathwaite A.L.* Increased temperature sensitivity of net DOC production from ombrotrophic peat due to water table draw-down // *Global Change Biology*. 2009. Vol. 15. Issue 4. April. P. 794–807.
 12. *D'Amore D.V., Fellman J.B., Edwards R.T. and Hood E.* Controls on dissolved organic matter concentrations in soils and streams from a forested wetland and sloping bog in southeast Alaska // *Ecohydrology*. 2010. Vol. 3. Issue 3. September. P. 249–261.
 13. *Olefeldt D., Roulet N.T.* Effects of permafrost and hydrology on the composition and transport of dissolved organic carbon in a subarctic peatland complex // *J. of Geophysical Research* 2012. 117. P. 1–15.
 14. *Иванова Е.С., Харанжевская Ю.А., Воистинова Е.С.* Многолетняя динамика содержания гуминовых веществ в водах низинного болота в южно-таежной подзоне Западной Сибири // *Вестник ТГУ. Биология*. 2012. № 2 (18). С. 7–16.
 15. *Гашикова Л.П.* Оценка влияния осушения олиготрофного болота на основе современного состояния фитоценоза и ботанического состава торфяной залежи // *X Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу*. Томск: Изд-во Аграф-Пресс, 2013. С. 191–193.
 16. *Гашикова Л.П., Синюткина А.А.* Оценка трансформации осушенного верхового болота (на примере участка Бакчарского болотного массива) // *Вестник ТГУ. Биология*. 2015. № 1 (29). С. 164–179.
 17. *Лурье Ю.Ю.* Унифицированные методы анализа вод. М.: Наука, 1973. 376 с.
 18. *Инишева А.И., Юхлин В.И., Зелингер Ф.Ф.* Определение ОВП почв прибором ЭСК-1. Томск: Томский ЦНТИ, 1975. № 35–75. 2 с.
 19. *Наставления гидрометеорологическим станциям и постам.* Л.: Гидрометеоиздат, 1990. Вып. 8. 201 с.
 20. *Чекотовский Э.В.* Графический анализ статистических данных в Microsoft Excel 2000. М.: Изд. дом «Вильямс», 2002. 464 с.
 21. *Дубровская Л.И., Кужевская И.В.* Анализ и прогнозирование гидрометеорологических данных в пакете «STATISTICA»: учебно-метод. комплекс. [Электронный ресурс]. Томск: ИДО ТГУ, 2007.
 22. *Халяфян А.А.* STATISTIC A 6. Статистический анализ данных. 3-е изд. М: ООО «Бином-Пресс», 2007. 512 с.
 23. *Ефремова Т.Т.* Почвообразование и диагностика торфяных почв болотных экосистем // *Почвоведение*. № 12. 1992. С. 25–35.
 24. *Зайдельман Ф.Р., Батраков А.С., Шваров А.П.* Изменение физических свойств торфяных почв после внесения песка разными способами // *Почвоведение*. 2005. № 2. С. 218–230.
 25. *Kane E.S., Turetsky M.R., Harden J.W., McGuire A.D., Waddington J.M.* Seasonal ice and hydrologic controls on dissolved organic carbon and nitrogen concentrations in a boreal-rich fen // *J. of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2010. Vol. 115. Issue G4. December. P. 2005–2012.

26. Köhler S.J., Buffam I., Laudon H., Bishop K.H. Climate's control of intra-annual and interannual variability of total organic carbon concentration and flux in two contrasting boreal landscape elements // J. of Geophysical Research: Biogeosciences. 2008. Vol. 113. Issue G3. September. P. 2005–2012.
27. Иванов К.Е. Водообмен в болотных ландшафтах. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 280 с.

Сведения об авторах:

Харанжевская Юлия Александровна, канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник, Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН; доцент, кафедра гидрологии, Национальный исследовательский Томский государственный университет; Россия, 634050, г. Томск, Гагарина, 3; e-mail: kharan@yandex.ru

Иванова Екатерина Сергеевна, младший научный сотрудник, Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН; Россия, 634050, г. Томск, Гагарина, 3; e-mail: ivanova_e_s@bk.ru

Воистинова Елена Сергеевна, научный сотрудник, Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН; Россия, 634050, г. Томск, Гагарина, 3; e-mail: elenavoistinova@yandex.ru