

## АГРОХИМИЯ И ПОЧВОВЕДЕНИЕ

УДК 551.481.2:551.796:571.51

doi: 10.17223/19988591/27/1

Е.Э. Веретенникова<sup>1</sup>, И.В. Курьина<sup>1</sup>, А.А. Ильина<sup>2</sup>, В.В. Савельев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,  
г. Томск, Россия

<sup>2</sup> Институт химии нефти СО РАН, г. Томск, Россия

### Реконструкция гидротермических условий формирования грядово-мочажинного комплекса в голоцене на юге Западной Сибири

На основании комплексных исследований различных биологических и геохимических индикаторов проведена реконструкция гидротермических условий формирования торфяных залежей на грядово-мочажинном комплексе, расположенном в северо-восточных отрогах Васюганского болота. Результаты качественного анализа сообществ раковинных амёб и растительных остатков в совокупности с данными по гумификации торфов позволили реконструировать и количественно оценить гидрологический режим торфяных залежей на гряде и мочажине. Водный палеорежим торфяных залежей имел асинхронный характер, свидетельствующий о разном режиме увлажнения в одни временные интервалы. Анализ структурных особенностей и свойств гуминовых кислот (Е4/Е6,  $C_{\text{alf}}/C_{\text{ar}}$ , Н/С) позволил судить об общей направленности колебаний, отражающих изменения тепла и влаги на разных этапах развития торфяных залежей грядово-мочажинного комплекса. В периоды с более холодными климатическими условиями (2 500–1 800, 800–600 и 200 л.н.) процессы гумификации, формирования ароматических структур в молекулах гуминовых кислот были выражены слабее, чем в более теплые климатические интервалы (1 700–1 000 л.н.).

**Ключевые слова:** грядово-мочажинный комплекс; торфяные залежи; раковинные амёбы; степень гумификации; гуминовые кислоты.

### Введение

Палеорекострукции очень важны для понимания эволюции природных условий. Одним из классических объектов палеорекострукций являются торфяные архивы болот, при изучении которых получают обширную и надёжную информацию как о глобальных, так и о региональных климатических событиях и условиях голоцена [1, 2].

Для палеоэкологических реконструкций используют различного рода биологические и геохимические индикаторы, каждый из которых несет

информацию об изменении того или иного компонента биоты, ландшафта или климата. К числу биологических индикаторов относятся растительные остатки, споры и пыльца, диатомовые водоросли, раковинные амебы и пр. Среди геохимических индикаторов наибольшее распространение получили химические элементы, их распределение и отношения, строение и свойства гуминовых кислот. Разнообразные свойства торфяных залежей неравномерно отражают действия различных факторов окружающей среды, однако их комплексное изучение с применением совокупности индикаторов позволяет получить наиболее полную и достоверную информацию о хронологии голоцена.

Западная Сибирь с ее обширными болотными массивами (заболоченность территорий от 30 до 70%) является уникальным регионом и представляет прекрасную возможность для проведения палеоклиматических и палеоэкологических исследований. На основе палеореконструкций торфяных архивов болот получены наиболее полные летописи палеоэкологических событий голоцена: установлена длительность существования болот, охарактеризованы основные палеоклиматические рубежи голоцена [2–7]. В то же время при хорошей изученности ботанического состава торфяных отложений болот зачастую отсутствуют данные детальных реконструкций или, напротив, не хватает репрезентативных данных, а имеющиеся сведения (позволяющие решить лишь общие вопросы реконструкции) необоснованно распространяются на обширные территории Западной Сибири [3].

Особый интерес представляют грядово-мочажинные комплексы, единого мнения о формировании которых до сих пор не сложилось [8–11].

Цель работы: провести реконструкцию гидротермических условий формирования торфяных залежей грядово-мочажинного комплекса в северо-восточных отрогах Васюганского болота на основе изучения различных биологических и геохимических индикаторов.

### **Материалы и методики исследования**

Материалом для исследований послужили торфяные залежи грядово-мочажинного комплекса (ГМК). Исследованный ГМК относится к Бакчарскому болотному массиву (56° 58' с. ш., 82° 36' в. д.), который является частью северо-восточных отрогов Васюганского болота. Степень заболоченности данной территории достигает 50%. Определение абсолютного возраста отдельных слоев проведено с применением метода радиоуглеродного датирования и описано в [12]. Полученные даты откалиброваны при помощи программного приложения Calib 7.0html (<http://calib.qub.ac.uk/calib/>) в системе ВР. Реконструкция сукцессии болотных фитоценозов ГМК проведена на основе ботанического состава торфов (рис. 1). Торфяные залежи позволяют рассмотреть историю их развития в суббореальном (SB) и субатлантическом (SA) периодах голоцена согласно периодизации Блитта–Сернандера [2].

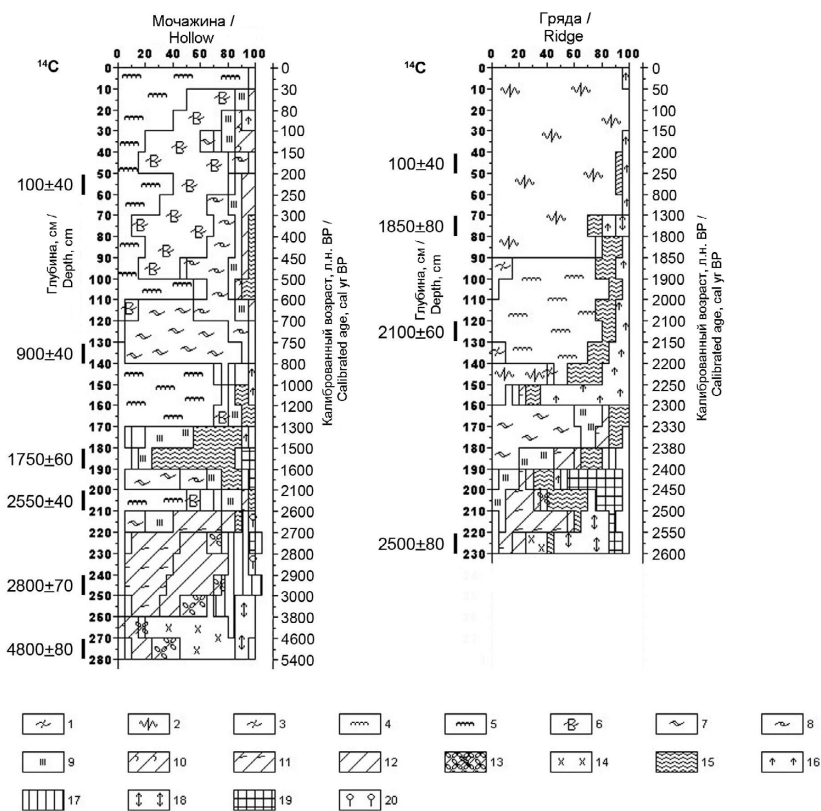


Рис. 1. Ботанический состав и радиоуглеродные датировки торфяных залежей ГМК /  
Fig. 1. Botanical composition and age dating of peat cores at ridge-hollow complex (RHC):

- 1 – *Sphagnum* sp.; 2 – *Sphagnum fuscum*; 3 – *S. angustifolium*; 4 – *S. magellanicum*;  
5 – *S. papillosum*; 6 – *S. balticum*; 7 – *S. majus*; 8 – *S. jensenii*; 9 – *Scheuchzeria palustris*;  
10 – *Carex limosa*; 11 – *C. rostrata*; 12 – *C. lasiocarpa*; 13 – *Menyanthes trifoliata*;  
14 – *Equisetum*; 15 – *Eriophorum vaginatum*; 16 – кустарнички (dwarf shrubs);  
17 – древесина (wood); 18 – *Pinus sylvestris*; 19 – *Betula*;  
20 – неопределенные травы (indeterminate herbs)

*Краткое описание стратиграфии торфяных залежей ГМК.* Мощность торфяной залежи на мочажине в месте бурения составляет 290 см. Торфяные отложения подстилаются минеральной почвой. Ботанический состав и радиоуглеродные датировки свидетельствуют о том, что заболачивание на данном участке началось 5 400 кал. л.н. в понижении дна на месте сосняка разнотравно-осоково-хвощового. Стадия развития (290–210 см), согласно полученным датировкам, охватывает весь SB период, в течение которого сформировался низинный торф двух видов – хвощовый и осоковый. Остальная часть торфяной залежи (210–0 см) сформирована в SA период. Согласно стратиграфии торфяной залежи на болоте господствовали группировки то-

пяной растительности олиготрофного типа, которая на данном временном отрезке претерпела шесть серий смен.

Мощность торфяной залежи на гряде составляет 230 см; начало болотообразовательного процесса соответствует SA периоду (рис. 1) и датируется возрастом 2600 кал. л.н. В это время в понижении рельефа торфяная залежь на мочажине находилась на мезотрофном этапе развития, когда уже было сформировано 80 см торфа. Заболачивание началось на месте березово-соснового разнотравного фитоценоза. В формировании торфяной залежи на гряде выделено два этапа: первый соответствует времени 2 600–2 200 кал. л.н. и отличается интенсивным торфонакоплением. За достаточно короткий период была сформирована почти метровая толща торфа (230–140 см), болотная (в основном евтрофная) растительность прошла шесть серий смен. Во время второго этапа, наиболее продолжительного (2 200 кал. л.н. по н. в.), выявлено три серии смен олиготрофной растительности. В настоящее время верховой ГМК представлен сосново-кустарничково-сфагновыми растительными сообществами на грядах и травяно-сфагновыми – на мочажинах.

Скорость торфонакопления, рассчитанная на основании имеющихся дат, в разные периоды существенно изменялась. На рис. 2 показана зависимость прироста торфа от возраста торфяных залежей, которая в обоих случаях описывает полиномиальный тренд. Средняя скорость накопления торфа в торфяных залежах мочажины и гряды составила  $1,14 \pm 0,65$  и  $1,72 \pm 0,73$  мм/год соответственно. В SB период мощность торфяной залежи на мочажине увеличивалась с относительной скоростью  $0,68 \pm 0,48$  мм/год; минимальная скорость в первой половине SB составила 0,12 мм/год, а во второй – резко возросла до 1,1 мм/год. В SA период средняя скорость торфонакопления на мочажине составила  $1,29 \pm 0,61$  мм/год, при этом более низкая скорость торфонакопления отмечается в начале SA периода, потом постепенно возрастает и на современном этапе составляет 2,0 мм/год. Обратная картина динамики торфонакопления – в торфяной залежи на гряде. Для нее, напротив, высокая скорость (2,42 мм/год) характерна на начальном этапе формирования, который приходится на первую половину SA. Примерно к 1 500 кал. л.н. она снизилась до 0,19 мм/год, в то время как на мочажине, напротив, начала возрастать. Примерно 250 кал. л.н. скорость торфонакопления на мочажине и гряде приблизительно сравнялась – 2,0 и 1,67 мм/год соответственно.

Таким образом, скорость торфонакопления в торфяных залежах ГМК в одни и те же временные интервалы была различной. Такой характер развития может свидетельствовать и об эндогенном развитии, и о влиянии экзогенных факторов [10].

Отбор образцов торфа на болоте произведен ручным геологическим буром ТБГ–1 послойно, с интервалом 10 см, в сентябре 2013 г. Применение комплекса методов позволило изучить гидротермические условия формирования торфяных залежей ГМК.

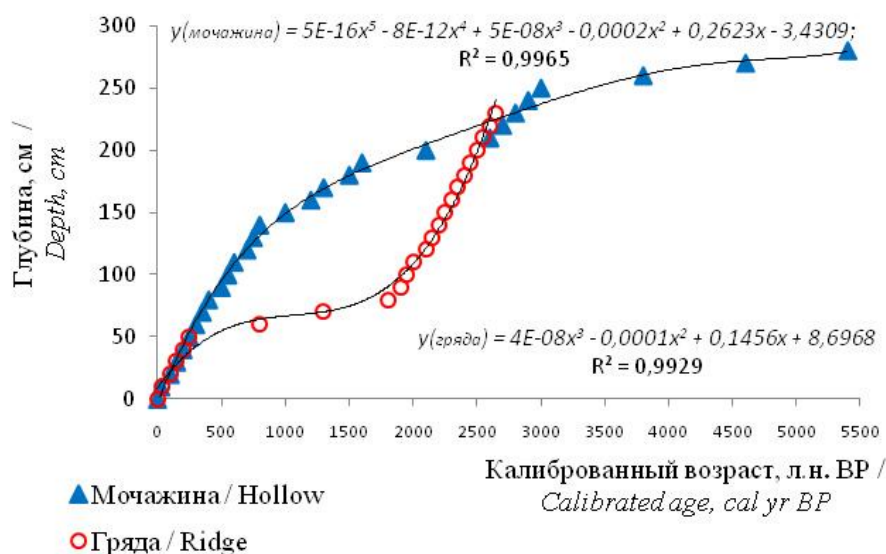


Рис. 2. Динамика торфонакопления в торфяных залежах ГМК /  
Fig. 2. Dynamics of peat accumulation rate in the peat cores at RHC

Отобранные образцы торфа подверглись ряду анализов. Количественная оценка гидрологического режима ГМК произведена на основе расчета индекса влажности (Iw) [13]. Локальная динамика увлажнения торфяных залежей ГМК оценивалась по степени гумификации торфов (Ih) [14] с использованием спектрофотометра UV-1601 (PC) Shimadzu (пр-во Япония; длина волны 540 нм). Расчет уровня болотных вод (УБВ) произведен на основе экологических оптимумов видов раковинных амёб по отношению к УБВ, полученных для района исследования [15], при помощи переходной функции [16] (программное приложение PAST 1.87). Подготовка проб к анализу сообществ раковинных амёб проведена по стандартной методике [17] (шаг 10, размер 5 см).

Для индикации палеоэкологических условий был использован комплекс диагностических признаков гуминовых кислот (ГК). Извлекали ГК 0,1 н раствором NaOH без нагревания, осаждали из экстракта 10%-ным раствором HCl, отмывали водой до нейтральной реакции и высушивали при комнатной температуре. Регистрацию электронных спектров поглощения 0,001%-ных водных растворов ГК проводили на УФ-спектрофотометре UVIKON 943 (Kontron Instruments, Италия) в диапазоне длин волн 190–700 нм в кварцевой кювете толщиной 1 см при значениях pH = 7,1–7,2. Из полученных спектров определяли показатели оптической плотности при 465 ( $E_{465}$ ) и 665 нм ( $E_{665}$ ) и вычисляли коэффициент экстинкции  $E_4/E_6$ . Отношения  $C_{\text{alit}}/C_{\text{ar}}$  рассчитывали по результатам ИК-спектроскопии. Регистрацию ИК-спектров ГК проводили на ИК-Фурье-спектрометре Nicolet 5700 (Thermo Electron corp., США);

анализ образцов проводили по методу прессования с КВг в отношении 1:100 соответственно в интервале значений частоты от 500 до 4000 см<sup>-1</sup>. Отношения Н/С и N/C определяли с использованием данных о содержании водорода, углерода и азота в молекулах ГК, полученных с помощью элементного анализатора Vario El Cube (Elementar, Германия).

Статистическая обработка полученных данных и построение графиков выполнены в программе SigmaStat 3.1, кроме того, графики были построены в программах PeatGraph, MS Excel для Windows XP.

Результаты анализа индикаторов гидротермических условий (индекс влажности, УБВ, индекс гумификации, а также свойства и структурные особенности ГК: коэффициент экстинкции, отношения  $C_{alif}/C_{ar}$ , Н/С, N/C) представлены на графиках в виде вертикальных кривых, иллюстрирующих изменения их значений во времени.

### Результаты исследования и обсуждение

Водный палеорежим торфяной залежи на мочажине характеризуется частыми сменами увлажнения (рис. 3). Выделяют несколько периодов сильной обводненности. Первый соответствует началу SB периода (5 400–3 700 кал. л.н.) и характеризуется довольно постоянными условиями водного режима:  $I_w$  изменяется от 6,5 до 6,8, УБВ колеблется от –13,9 до –23,6 см. Второй период обводненности совпадает с переходом торфяной залежи на мезотрофный тип питания и соответствует началу SA периода (2 600–2 100 кал. л.н.):  $I_w$  – 6,7, УБВ от –16 до –20 см. Третий интервал соответствует второй половине SA (750–600 кал. л.н.), характеризуется максимальной увлажненностью за всю историю формирования торфяной залежи:  $I_w$  8,8–8,9, УБВ варьирует от –7 до –9 см. Максимально дренированные условия ( $I_w$  – от 4,2 до 4,4, УБВ – от –25 до –30 см) отмечаются в периоды 3 800–2 700 кал. л.н. и 2 500 и 1 500 кал. л.н. соответственно. Таким образом, вторая половина SB была значительно суше по сравнению с SA.

Следует отметить, что, несмотря на вариации режима увлажнения торфяной залежи в SB периоде, процесс гумификации торфов был довольно постоянным ( $I_h$  изменяется от 0,72 до 1,1), с некоторым усилением во второй половине SB (0,86–1,1). В SA периоде, в отличие от периода SB, наиболее ярко выражены колебания  $I_h$ . Величина гумификации достигла наивысших значений в периоды 2 500, 1 500, 900 кал. л.н., что отражает ксероморфные условия [18]. В интервалы 2 300–1 600 и 800–600 кал. л.н., значения индекса  $I_h$  были низкими, что указывает на повышение уровня обводненности на болоте [18].

Водный палеорежим торфяной залежи на гряде характеризуется наибольшей амплитудой варьирования гидрологических параметров в первой половине SA (2 500–1 800 кал. л.н.) (рис. 3). Внутри этого интервала выделяют два периода: максимальное увлажнение, соответствующее возрасту



2 300 кал. л.н. ( $I_w$  – 7,6–8,1, УБВ от –7 до –9 см), за которым последовало резкое осушение ( $I_w$  – 2,4, УБВ – –27 см,  $I_h$  – 0,74), датированное возрастом 2 200 кал. л.н. Вторая половина SA периода на гряде характеризуется более низким варьированием значений палеогидрологических параметров, которые свидетельствуют о менее влажных условиях:  $I_w$  от 2,8 до 4,0, УБВ от –21 до –23 см. Высокая интенсивность степени гумификации торфов характерна только на начальной стадии формирования гряды, в период переменного режима увлажнения, после чего гумификация стабилизировалась на более низком уровне.

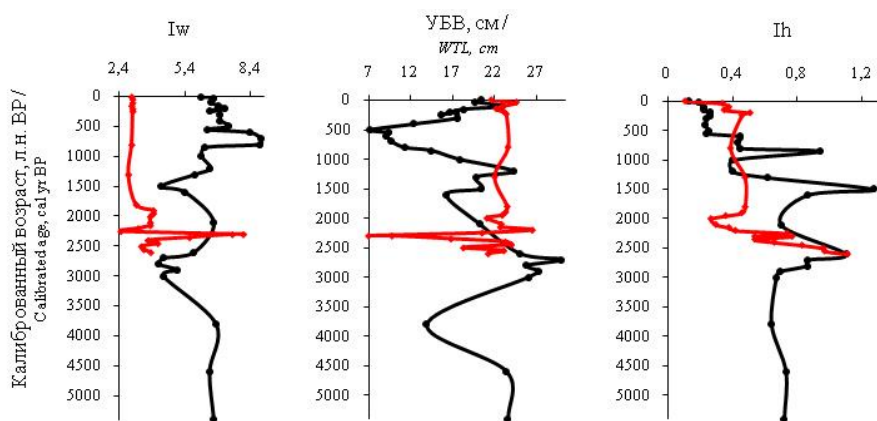


Рис. 3. Динамика значений показателей водного палеорежима торфяных залежей ГМК (черная линия – мочажина, красная линия – гряда) /

Fig. 3. Change of palaeohydrological data in the peat cores at RHC (black line - at hollow, red line - at ridge). WTL - water table level

Корреляционный анализ по двум торфяным залежам не выявил значимых связей между изменениями гидрологических показателей в течение всего периода их совместного развития (2 600 лет) ( $r = -0,05$  при  $p < 0,05$  для параметра  $I_w$ ;  $r = -0,49$  при  $p < 0,05$  для параметра УБВ;  $r = -0,13$  при  $p > 0,05$  для параметра  $I_h$ ). Таким образом, можно констатировать, что водный палеорежим торфяных залежей был в большей степени асинхронным; амплитуда изменений гидрологических параметров в торфяной залежи на мочажине выше, чем на гряде. Асинхронность отклика и разная степень его выраженности на гряде и мочажине обусловлена, по нашему мнению, их разной чувствительностью к изменениям внешних условий. Мочажина более чувствительна, поскольку в разные периоды формирования, по-видимому, испытывала влияние гряды за счет сброса избыточной влаги последней. К тому же болотные растения, слагающие торф, на мочажине развивались в более экстремальных условиях по обводненности и потому оказались более чувствительными к изменениям водного режима по сравнению с растениями на гряде.

В процессе изучения структурных особенностей гуминовых кислот (ГК) можно получить информацию относительно особенностей палеоклимата. Индикаторная значимость ГК различных природных объектов в целях палеореконокструкций описана в литературе и уже не вызывает сомнений. Известно, что некоторые свойства и структурные особенности ГК, специфичные по отношению к природной среде, такие, например, как элементный состав, доля углерода в алифатических и ароматических структурах, оптические свойства и др., сохраняются во времени [19–21]. Это положение хорошо иллюстрируется материалами обобщения литературных данных о составе и структурных особенностях гуминовых кислот почв [19–25]. Исследования показали перспективность такого подхода для палеореконокструкций по торфяным архивам [26–31].

Одним из признаков ГК, специфичных по отношению к климату и природной обстановке в целом, адекватно отражающих состояние природной среды в период формирования, является оптическая плотность ГК, измеренная при разных длинах волн (коэффициент экстинкции ( $E_4/E_6$ ) [25]. Коэффициент экстинкции часто используется для описания степени конденсации ароматических структур: низкое отношение коэффициента отражает более высокую степень конденсированности ароматических фрагментов и степень их сформированности, в то время как высокое отношение коэффициента означает наличие большего количества алифатических структур в молекуле ГК и низкую величину конденсированности ароматического ядра [32]. В сухих и теплых условиях образуются ГК, имеющие хорошо сформированную ароматическую часть, составляющую большую долю макромолекул, и небольшую алифатическую часть. В холодных и влажных условиях формируются ГК с большей долей периферической части, что отражается на изменении абсолютных величин коэффициентов, характеризующих оптические свойства этого компонента почв [33].

В обеих торфяных залежах отмечают три области увеличения коэффициента экстинкции, которые по времени совпадают и соответствуют интервалам 2 500–1 700, 800–600 и 200 кал. л. н., что указывает на уменьшение степени конденсированности ароматических структур в молекулах ГК торфов, сформированных в эти временные интервалы (рис. 4).

Данные ИК-спектроскопии свидетельствуют об увеличении алифатических фрагментов в структуре ГК торфов, сформированных в эти периоды, что видно из отношения оптических плотностей полос поглощения  $A_{2925}/A_{1640}$ , характеризующего валентные колебания алифатического ( $C_{alif}$ ) и ароматического углерода ( $C_{ar}$ ) соответственно в молекуле ГК (рис. 4). Таким образом, можно предположить, что в это время торфяная залежь формировалась в более суровых климатических условиях. Уменьшение значений коэффициента экстинкции, свидетельствующее об увеличении конденсированности молекул, выявлено в ГК торфов, соответствующих возрасту 1 700–1 000 кал. л.н. (рис. 4). Согласно данным ИК спектроскопии в молекулах



ГК торфов данного временного отрезка увеличивается доля ароматических структур, о чем свидетельствует уменьшение значения отношения  $C_{\text{alif}}/C_{\text{ar}}$ . Структурные особенности ГК свидетельствуют о том, что процесс аккумуляции торфов происходил в более теплых условиях по сравнению с предыдущими. В SB период (5 400–2 600 кал. л.н.) значения коэффициента экстинкции сильных изменений не претерпевают, однако отмечается некоторое увеличение отношения  $C_{\text{alif}}/C_{\text{ar}}$  3 800 кал. л.н.

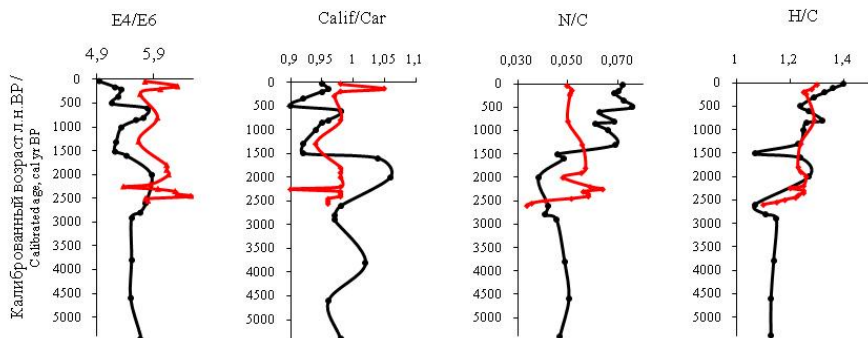


Рис. 4. Изменения коэффициента экстинкции ( $E_4/E_6$ ), величин отношения  $C_{\text{alif}}/C_{\text{ar}}$ ,  $H/C$  и  $N/C$  в гуминовых кислотах торфяных залежей ГМК (черная линия – мочажина, красная линия – гряда) /

Fig. 4. Changes of  $E_4/E_6$ ,  $C_{\text{alif}}/C_{\text{ar}}$ ,  $H/C$  and  $N/C$  ratios in humic acids of the peat cores (black line - at hollow, red line - at ridge)

Индекс  $H/C$ , используемый в целях диагностики и палеореконструкции природной среды, является климатогенно обусловленным и сохраняет свои параметры во времени [19, 20, 34], его зависимость от степени ароматичности ядра ГК была показана в [29, 32, 34]. Согласно полученным данным по элементному составу ГК колебания индекса  $H/C$  находятся в узких пределах: от 1,1 до 1,4 – на мочажине и от 1,1 и 1,3 – на гряде. В обеих торфяных залежах изменение значений  $H/C$  во времени практически синхронно с ходом кривой  $C_{\text{alif}}/C_{\text{ar}}$  (см. рис. 4), что вполне закономерно и согласуется с литературными данными [29, 30].

Индекс  $N/C$  отражает условия гумификации торфов [30], а также свидетельствует об изменении условий обводненности. В работе [27] показана зависимость изменения индекса  $N/C$  от положения уровня болотных вод в торфяных залежах. При повышении уровня болотных вод значение индекса увеличивается и наоборот: низким значениям УБВ соответствуют низкие значения индекса. Сопоставление индекса  $N/C$  с данными по реконструированным УБВ торфяных залежей показало, что наибольший отклик данный индикатор получил в торфяной залежи на мочажине, меньше сила корреляционной связи в торфяной залежи на гряде. Уравнения регрессии, отражающие связь с параметрами, имеют следующий вид:

$$[N/C]_{\text{мочажина}} = 0,0831 - (0,00138 \text{ УБВ}); r = 0,621, p < 0,001;$$

$$[N/C]_{\text{гряды}} = 0,0581 - (0,000332 \text{ УБВ}); r = 0,21, p < 0,001.$$

Сравнивая результаты идентичных параметров, характеризующих палеоэкологические условия по двум торфяным залежам на ГМК, можно отметить, что наиболее синхронно изменяется коэффициент экстинкции ( $r = 0,56, p < 0,05$ ), менее синхронно – значения индексов  $C_{\text{alif}}/C_{\text{ar}}$  ( $r = 0,26, p < 0,05$ ) и  $H/C$  ( $r = 0,26, p < 0,05$ ) и совсем не синхронно –  $N/C$  ( $r = -0,13, p < 0,05$ ). В основном несинхронность значений проявляется в интервале 2 600–2 200 кал. л.н., в период активного роста торфяной залежи на гряде, хотя и в этот период можно отметить общий направленный тренд изменений параметров. Очевидно, что несинхронное изменение индекса  $N/C$  обусловлено его зависимостью от параметров гидрологического режима, значения которых в торфяных залежах в одни временные интервалы часто имеют противоположные тенденции.

Таким образом, полученные сведения об изменении структурных особенностей и свойств ГК (коэффициент экстинкции, отношение  $C_{\text{alif}}/C_{\text{ar}}$ , величины индексов  $H/C$  и  $N/C$ ) в совокупности с палеогидрологическими параметрами ( $I_w$ ,  $I_h$ , УБВ) позволили нам судить о локальной динамике условий, в которых шло формирование торфяных залежей ГМК.

По нашим данным, теплые и влажные условия соответствуют датировкам 2 600–2 500 л.н., которые сменились на холодные и влажные 2 400–1 800 кал. л.н., с максимально холодными условиями, приходящимися на период 2 000 кал. л.н. Согласно [5] примерно в это же время отмечается похолодание, соответствующее периоду 2 300–2 000 л.н., во время которого произошло резкое усиление процессов олиготрофизации болот. Согласно полученным нами данным, в период с 2 000 до 1 000 кал. л.н. динамика кривых на графиках свидетельствует об изменении условий в сторону потепления с постепенным снижением влажности на мочажине. Примерно в это же время отмечается потепление [6], которое пришлось на период  $2015 \pm 40$ – $1760 \pm 40$  л.н. Наиболее ксероморфные условия соответствуют периоду 900 и 1500 кал. л.н., более ярко они проявились на мочажине. Данные палеоэкологических реконструкций на Обь-Васюганском водоразделе [7] свидетельствуют, что в период с  $1435 \pm 35$  по  $1280 \pm 30$  л.н. было значительное потепление. Период 700–600 кал. л.н. отмечен похолоданием с максимально обводненными условиями на мочажине; на гряде в это время было значительно суше. Данный этап может быть отражением похолодания, известного в литературе под названием «Малая ледниковая эпоха» [5].

Таким образом, есть основания полагать, что проведенная реконструкция локальных условий палеосреды на основании рассматриваемых индикаторов вполне адекватно согласуется с уже известными палеоэкологическими реконструкциями на территории Западной Сибири.

### Заключение

Комплексные исследования и сравнительный анализ различных индикаторных признаков позволили реконструировать гидротермические условия, в которых протекал процесс торфонакопления залежей ГМК. Водный палеорежим на гряде и мочажине был в разные временные интервалы различным и имел асинхронный характер. Наиболее вероятно, он был в значительной степени обусловлен эндогенными факторами болотообразовательного процесса. При изучении структурных особенностей и свойств ГК выявлены различные по теплообеспеченности временные интервалы, которые в обеих торфяных залежах совпадают, что, вероятно, является отражением воздействия внешних факторов (влияние климата). Разная теплообеспеченность (смена климатической обстановки) в разные временные интервалы оказывает существенное влияние на структурные особенности ГК. Установлено, что в периоды, когда торфообразование шло по более «холодным» сценариям, процессы гумификации, формирование ароматических структур в молекулах ГК, степень их обуглероженности были выражены слабее. Напротив, в менее жестких климатических условиях процесс гумификации сопровождался образованием ГК, молекулы которых более обуглерожены и имеют ядро с явным преобладанием ароматических структур. Реконструированные характеристики условий среды, полученные с применением различных индикаторов, довольно хорошо согласуются между собой, подтверждая и дополняя результаты друг друга. Комплексный анализ исследованных торфяных залежей на ГМК показал их тесное взаимодействие в течение истории формирования, а реконструированные условия вполне адекватно согласуются с результатами уже известных палеоэкологических реконструкций на территории Западной Сибири.

### Литература

1. Aaby B. Cyclic climatic variations in climate over the past 5500 years reflected in raised bogs // *Nature*. 1976. № 63. P. 281–284.
2. Хотинский Н. А. Голоцен Северной Евразии. М. : Наука, 1977. 197 с.
3. Бляхарчук Т.А. Торфяные отложения болот как летопись палеогеографической информации // Материалы четвертой научной школы Болота и Биосфера. 12–15 сентября 2005 г. Томск : Изд-во ЦНТИ, 2005. С. 133–136.
4. Архипов С.А., Волкова В.С. Глобальная история. Ландшафты и климаты плейстоцена и голоцена Западной Сибири // Тр. ОИГГМ СО РАН. Новосибирск, 1994. Вып. 823. 106 с.
5. Волкова В.С., Бахарева В.А., Левина Т.П. Растительность и климат голоцена Западной Сибири // Палеоклиматы позднеледникового и голоцена. М. : Наука, 1989. С. 90–95.
6. Глебов Ф.З., Карпенко Л.В. Динамика болотной и суходольной растительности и климата междуречья Оби и Васюгана в голоцене // Лесоведение. 1999. № 5. С. 35–40.
7. Глебов Ф.З., Карпенко Л.В., Климанов В.А., Миндеева Т.Н. Палеоэкологический анализ торфяного разреза «Назино» (среднетаежная подзона Западной Сибири) // Сибирский экологический журнал. 2001. № 6. С. 683–688.

8. Ниценко А.А. О происхождении грядово-мочажинного рельефа на болотах // Вестник Ленинградского университета. Сер. Биология. 1964. № 21. Вып. 4. С. 75–87.
9. Бахнов В.К. Биогеохимические аспекты болотообразовательного процесса. Новосибирск : Наука, 1986. 193 с.
10. Васильев С.В. Лесные и болотные ландшафты Западной Сибири. Томск : Изд-во НТЛ, 2007. 276 с.
11. Прейс Ю.И., Карпенко Л.В. Особенности стратиграфии, динамики и генезиса олиготрофного грядово-мочажинного комплекса в междуречье Оби и Васюгана (среднетаежная подзона Западной Сибири) // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т. 308. № 1. С. 48–53.
12. Веретенникова Е.Э., Кuryina И.В. Эволюция грядово-мочажинного комплекса южнотаежной подзоны Западной Сибири // География и природные ресурсы. 2014. № 2. С. 91–99.
13. Елина Г.А., Юрковская Т.К. Методы определения палеогидрологического режима как основа объективизации причин сукцессий растительности болот // Бот. журн. 1992. Т. 77, № 7. С. 120–124.
14. Chambers F.M., Blackford D.W., Yu Z. Methods for determining peat humification and for quantifying peat bulk density, organic matter and carbon content for palaeostudies of climate and peatland carbon dynamics // Mires and Peat. 2011. Vol. 7 (2010/11). P. 1–10.
15. Кuryina И.В. Экология раковинных амёб олиготрофных болот южной тайги Западной Сибири как индикаторов водного режима // Известия Пензенского государственного педагогического университета им. В.Г. Белинского. 2011. № 25. С. 368–375.
16. ter Braak C. J. F., van Dam H. Inferring pH from diatoms: a comparison of old and new calibration methods // Hydrobiologia. 1989. 178. P. 209–223.
17. Рахлеева А.А., Корганова Г.А. К вопросу об оценке численности и видового разнообразия раковинных амёб (Rhizopoda, Testacea) в таежных почвах // Зоологический журнал. 2005. Т. 84, № 12. С. 1427–1436.
18. Payne R.J., Blackford J.J. Peat humification and Climate change: a multy-site comparison from mires in south-east Alaska // Mires and peat. 2008. Vol. 3. P. 1–11.
19. Дергачева М.И. Гумусовые вещества как источник информации о природной среде формирования // Известия аграрной науки. 2011. Т. 9, № 2. С. 57–61.
20. Дергачева М.И., Некрасова О.А., Оконешикова М.В., Васильева Д.И., Гаврилов Д.А., Очур К.О., Ондар Е.Э. Соотношение элементов в гуминовых кислотах как источник информации о природной среде формирования почв // Сибирский экологический журнал. 2012. № 5. С. 667–676.
21. Дергачева М.И., Рябова Н.Н. Коррелятивные связи состава гумуса и климатических показателей в условиях горных территорий юга Сибири // Вестник Томского государственного университета. 2005. № 15. С. 68–71.
22. Дергачева М.И., Очур К.О. Реконструкция изменений природной среды в течение голоцена педогумусовым методом на территории Центрально-Тувинской котловины // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2012. № 1 (17). С. 5–17.
23. Фоминых Л.А., Золотарева Б.Н., Пинский Д.Л. Сравнительный анализ палеопочв в древних ландшафтах севера России // Криосфера Земли. 2010. Т. XIV, № 2. С. 56–68.
24. Ковалева Н.О. Почвы как индикатор изменений климата последних 30 тысяч лет в горных регионах Средней Азии // Доклады по экологическому почвоведению. 2006. Т. 2, № 2. С. 1–20.
25. Chen Y., Senesi N., Schnitzer M. Information provided on humic substances by E4/E6 ratios // Soil Science Society American Journal. 1977. № 41. P. 352–358.
26. Ларин С.И., Ларина Н.С., Меркушина Г.А., Рябогина Н.Е. Реконструкция палеоклиматических условий на юге Западной Сибири в голоцене (по данным геохимического и палинологического изучения торфяников) // Материалы Третьей всероссийской науч-

- ной конференции (с международным участием) «Динамика современных экосистем в голоцене» 12–15 марта 2013 г. Казань, Республика Татарстан, Россия. С. 228–231.
27. *Ortiz J.E., Torres T., Delgado A., Julia R., Lucini M., Llamas F.J., Reyes E., Soler V., Valle M.* The palaeoenvironmental and palaeohydrological evolution of Padul Peat Bog (Granada, Spain) over one million years, from elemental, isotopic and molecular organic geochemical proxies // *Organic Geochemistry*. 2004. № 35. P. 1243–1260.
28. *Zaccone C., Miano T.M., Shotyk W.* Qualitative comparison between raw peat and related humic acids in an ombrotrophic bog profile // *Organic Geochemistry*. 2007. № 38. P. 151–160.
29. *Zaccone C., Sanei H., Outridge P.M., Miano T.M.* Studying the humification degree and evolution of peat down a Holocene bog profile (Inuvik, NW Canada): a petrological and chemical perspective // *Organic Geochemistry*. 2011. № 42. P. 399–408.
30. *Borgmark A.* Holocene climate variability and periodicities in South-Central Sweden, as interpreted from peat humification analysis // *Holocene*. 2005. № 3. Vol. 15. P. 387–395.
31. *Anderson H., Hepburn A.* Variation of humic substances within peat profile // *Peat and Water* / C.H. Fichsman ed. N.Y. : Academic press, 1986. P. 177–194.
32. *Milori D.M., Neto L.M., Bayer C., Mielniczuk J., Bagnato V.S.* Humification degree of soil humic acids determined by fluorescence spectroscopy // *Soil Science*. 2002. № 11. P. 739–749.
33. *Мартынова Н.А.* Химия почв: органическое вещество почв. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2011. 257 с.
34. *Calderoni G., Shnitzer M.* Effect of age on the chemical structure of paleosol humic acids and fulvic acids // *Geochemica and Cosmochemica Acta*. 1984. Vol. 48. P. 2045–2051.

Поступила в редакцию 23.04.2014 г.;  
принята 25.06. 2014 г.

#### Авторский коллектив:

**Веретенникова Елена Эдуардовна** – канд. биол. наук, м.н.с. лаборатории физики климатических систем Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия). E-mail: [lena2701@yandex.ru](mailto:lena2701@yandex.ru)

**Курьина Ирина Владимировна** – канд. биол. наук, м.н.с. лаборатории мониторинга лесных экосистем Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия). E-mail: [klimirin@sibmail.com](mailto:klimirin@sibmail.com)

**Ильина Анна Александровна** – инженер лаборатории физико-химических методов исследования Института химии нефти СО РАН (г. Томск, Россия). E-mail: [ilanna1@yandex.ru](mailto:ilanna1@yandex.ru)

**Савельев Вадим Владимирович** – канд. хим. наук, н.с. лаборатории углеводородов и высокомолекулярных соединений Института химии нефти СО РАН (г. Томск, Россия). E-mail: [sav\\_vad@sibmail.com](mailto:sav_vad@sibmail.com)

\*Elena E. Veretennikova<sup>1</sup>, Irina V. Kurina<sup>1</sup>, Anna A. Il'ina<sup>2</sup>, Vadim V. Savel'ev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological System, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation.*

\*E-mail: [lena2701@yandex.ru](mailto:lena2701@yandex.ru)

<sup>2</sup>*Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation*

### **Palaeoenvironmental reconstruction of a Holocene peat bog ridge-hollow complex in the south of West Siberia**

The purpose of our study was a palaeoenvironmental reconstruction of the bog peat cores from ridge-hollow complex based on biomarkers proxy (testate amoebae, plant remains) and geochemical data of humic acids properties. The ridge-hollow complex is located in the northeastern spurs of the Vasyugan mire (56°58'N 82°36'E) in the southern taiga zone of West Siberia. One of the cores was formed at the hollow (Hollow core) and the second - at the ridge (Ridge core); the peat accumulation is stated ~5400 and 2600 cal yr BP at Hollow core and at Ridge core, respectively. Peat samples from both cores of RHC were collected on the 12<sup>th</sup> September 2012 using a Russian peat corer, underneath with 10 cm intervals.

The results of biomarkers proxy (index humification, index wetness, testate amoebae analysis) allowed us to reconstruct and give estimations of palaeohydrological conditions of peat cores. The palaeoenvironmental studies used multiproxy analysis including peat humification data, wetness index, testate amoebae analysis, elemental (atomic ratios H/C, N/C) and spectral characterization (UV-Vis, IR) of peat humic acids. Each of the cores displays rather different palaeohydrological conditions along the profiles and, thus, records varied responses to local environmental changes. In fact, these data indicate the presence of 3 distinct wet shifts at the Hollow core: at 5400-3700, 2600-2100 and 750-600 cal yr BP; and dry episodes are revealed at 2500, 1500 and 900 cal yr BP. For Ridge core, palaeohydrological terms have a high variability in the first part of the Subatlantic (2600-1800 cal yr BP); in the second part – conditions are not so wet.

The results of geochemical data (elemental and spectral characterization of peat humic acids) show that humic acids characteristics revealed the one-way trend in the terms (E4/E6, Calif/Car, H/C) reflecting synchronic changes of warm and wet conditions in peat cores. Climate changes have a significant effect on the characteristics of humic acids. During periods with colder conditions (2500-1800, 800-600 and 200 cal yr BP), humification processes and formation of aromatic molecules were less pronounced compared to warmer conditions corresponding to 1700-1000 cal yr BP. The multiproxy studies of peat cores from ridge-hollow complex showed their close interaction during their joint formation and the palaeoenvironmental records are in a good agreement with the already known results in palaeoecological reconstructions in West Siberia.

*The article contains 4 figures, 34 ref.*

**Key words:** ridge-hollow complex; peat deposits; testate amoebae; humification; humic acids.



### References

1. Aaby B. Cyclic climatic variations in climate over the past 5500 years reflected in raised bogs. *Nature*. 1976;63:281-284. doi: <http://dx.doi.org/10.1038/263281a0>
2. Khotinskiy NA. Golotsen Severnoy Evrazii [The holocene of Northern Eurasia]. Moscow: Nauka Publishing House; 1977. 197 p. In Russian
3. Blyakharchuk TA. Torfyanye otlozheniya bolot kak letopis' paleogeograficheskoy informatsii [Peat bogs sediments as a record of paleogeographic information]. *Bolota i Biosfera. Materialy chetvertoy nauchnoy shkoly. 12-15 sentyabrya 2005* [Mires and Biosphere. Proceedings of the Fourth Research School. 12-15 September 2005]. Tomsk: TsNTI Publishers; 2005. p. 133-136. In Russian
4. Arkhipov SA, Volkova VS. Global'naya istoriya. Landshafty i klimaty pleystotsena i golotsena Zapadnoy Sibiri [Global history. Landscapes and climates of the Pleistocene and Holocene in Western Siberia]. *Tr. OIGGM SO RAN – Proceedings UIGGM SB RAS*. Novosibirsk: NITs OIGGM SO RAN Izdatelstvo; 1994. Vol. 823. 106 p. In Russian
5. Volkova VS, Bakhareva VA, Levina TP. Rastitel'nost' i klimat golotsena Zapadnoy Sibiri [Holocene vegetation and climate of Western Siberia]. *Paleoklimaty pozdnelednikov'ya i golotsena* [In: *Paleoclimates of Late Glacial and Holocene*]. Moscow: Nauka Publishing House; 1989. p. 90-95. In Russian
6. Glebov FZ, Karpenko LV. Dinamika bolotnoy i sukhodol'noy rastitel'nosti i klimata mezhdurech'ya Obi i Vasyugana v golotsene [Dynamics of mire and upland vegetation and climate in the interfluvium of the Ob and the Vasyugan rivers during the Holocene]. *Lesovedenie*. 1999;5:35-40. In Russian
7. Glebov FZ, Karpenko LV, Klimanov VA, Mindeeva TN. Paleoekologicheskii analiz torfyano-golotsenogo razreza "Nazino" (srednetaezhnaya podzona Zapadnoy Sibiri) [Paleoecological analysis of the peat core "Nazino" (middle taiga subzone of West Siberia)]. *Sibirskiy ekologicheskii zhurnal*. 2001;6:683-688. In Russian
8. Nitsenko AA. O proiskhozhdenii gryadovo-mochazhinnoy rel'efa na bolotakh [On the origin of the ridge-hollow relief in swamps]. *Vestnik Leningradskogo universiteta. Ser. Biologiya*. 1964;21(4):75-87. In Russian
9. Bakhnov VK. Biogeokhimicheskie aspekty bolotoobrazovatel'nogo protsessa [Biogeochemical aspects of mire formation process]. Novosibirsk: Nauka Siberian branch Publishing House; 1986. 193 p. In Russian
10. Vasil'ev SV. Lesnye i bolotnye landshafty Zapadnoy Sibiri [Forests and Wetlands of West Siberia]. Tomsk: NTL Publishing House; 2007. 276 p. In Russian
11. Preys YuI, Karpenko LV. Osobennosti stratigrafii, dinamiki i genezisa oligotrofnogo gryadovo-mochazhinnoy kompleksa v mezhdurech'e Obi i Vasyugana (srednetaezhnaya podzona Zapadnoy Sibiri) [Features of stratigraphy, dynamics and genesis of the oligotrophic ridge-hollow complex in the interfluvium of the Ob and the Vasyugan rivers (middle taiga subzone of Western Siberia)]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2005;308(1):48-53. In Russian
12. Veretennikova EE, Kurina IV. Evolyutsiya gryadovo-mochazhinnoy kompleksa yuzhnootaezhnoy podzony Zapadnoy Sibiri [Evolution of the ridge-hollow complex in the southern taiga subzone of West Siberia]. *Geografiya i prirodnye resursy*. 2014;2:91-99. In Russian
13. Elina GA, Yurkovskaya TK. Metody opredeleniya paleogidrologicheskogo rezhima kak osnova ob'ektivizatsii prichin suksessiy rastitel'nosti bolot [Methods for determining palaeohydrological regime as the basis for objectivization of the causes of mire vegetation successions]. *Botanicheskii zhurnal – Botanical Journal*. 1992;77(7):120-124. In Russian
14. Chambers FM, Blackford DW, Yu Z. Methods for determining peat humification and for quantifying peat bulk density, organic matter and carbon content for palaeostudies of climate and peatland carbon dynamics. *Mires and Peat*. 2011;7:1-10.

15. Kurina IV. Ecology of testate amoebae as hydrological regime indicators in oligotrophic peatlands in the southern taiga of Western Siberia. *Izvestiya Penzenskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. V.G. Belinskogo*. 2011;25:368-375. In Russian
16. ter Braak CJF, van Dam H. Inferring pH from diatoms: a comparison of old and new calibration methods. *Hydrobiologia*. 1989;178:209-223. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/BF00006028>
17. Rakhleeva AA, Korganova GA. To the estimation of shell amoeba (Rhizopoda, Testacea) population and species diversity in taiga. *Zoologicheskii zhurnal*. 2005;84(12):1427-1436. In Russian
18. Payne RJ, Blackford JJ. Peat humification and Climate change: a multi-site comparison from mires in south-east Alaska. *Mires and peat*. 2008;3:1-11.
19. Dergacheva MI. Humic substance as a carrier of information about the environment of its formation. *Izvestiya agrarnoy nauki – Annals of Agrarian Science*. 2011;9(2):57-61. In Russian
20. Dergacheva MI, Gavrilov DA, Ochur KO, Nekrasova OA, Okoneshnikova MV, Vasil'eva DI, Ondar EE. Ratio of elements in humic acids as a source of information about soil formation environment. *Contemporary Problems of Ecology*. 2012;5:497-504.
21. Dergacheva MI, Ryabova NN. Korrelyativnye svyazi sostava gumusa i klimaticheskikh pokazateley v usloviyakh gornykh territoriy yuga Sibiri [Correlation links of humus composition and climatic parameters in mountainous areas of southern Siberia]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2005;15:68-71. In Russian
22. Dergacheva MI, Ochur KO. Environment changes reconstruction by pedohumic method in the Central-Tuvan hollow during the Holocene period. *Tomsk State University Journal of Biology*. 2012;1(17):5-17. In Russian, English Summary
23. Fominykh LA, Zolotareva BN, Pinsky DL. Comparative analysis of paleosols of Northern Russia]. *Kriosfera Zemli – Earth Cryosphere*. 2010;XIV(2):56-68. In Russian
24. Kovaleva NO. Pochvy kak indikator izmeneniy klimata poslednykh 30 tysyach let v gornykh regionakh Sredney Azii [Soil as an indicator of climate change in the last 30,000 years in the mountainous regions of Central Asia]. *Doklady po ekologicheskomu pochvovedeniyu – Interactive Journal of Ecological Soil Science*. 2006;2(2):1-20. In Russian
25. Chen Y, Senesi N, Schnitzer M. Information provided on humic substances by E4/E6 ratios. *Soil Science Society American Journal*. 1977;41:352-358. doi: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1977.03615995004100020037x>
26. Larin SI, Larina NS, Merkushina GA, Ryabogina NE. Rekonstruktsiya paleoklimaticheskikh usloviy na yuge Zapadnoy Sibiri v golotsene (po dannym geokhimicheskogo i palinologicheskogo izucheniya torfyanikov) [Reconstruction of paleoclimatic conditions in the south of West Siberia in the Holocene (based on data of geochemical and palynological studies of peatlands)]. *Dinamika sovremennykh ekosistem v golotsene. Materialy tret'ey vserossiyskoy nauchnoy konferentsii (s mezhdunarodnym uchastiem). 12-15 marta 2013 g.* [The dynamics of modern ecosystems in the Holocene. Proc. of the Third Russian Scientific Conference (with international participation). 12-15<sup>th</sup> of March 2013]. Kazan', Tatarstan, Russian Federation. p. 228-231. In Russian
27. Ortiz JE, Torres T, Delgado A, Julia R, Lucini M, Llamas FJ, Reyes E, Soler V, Valle M. The palaeoenvironmental and palaeohydrological evolution of Padul Peat Bog (Granada, Spain) over one million years, from elemental, isotopic and molecular organic geochemical proxies. *Organic Geochemistry*. 2004;35:1243-1260. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.orggeochem.2004.05.013>
28. Zaccone C, Miano TM, Shotyk W. Qualitative comparison between raw peat and related humic acids in an ombrotrophic bog profile. *Organic Geochemistry*. 2007;38:151-160. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.orggeochem.2006.06.023>
29. Zaccone C, Sanei H, Outridge PM, Miano TM. Studying the humification degree and evolution of peat down a Holocene bog profile (Inuvik, NW Canada): a petrological and chemi-

- cal perspective. *Organic Geochemistry*. 2011;42:399-408. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.orggeochem.2011.02.004>
30. Borgmark A. Holocene climate variability and periodicities in South-Central Sweden, as interpreted from peat humification analysis. *Holocene*. 2005;3(15):387-395. doi: <http://dx.doi.org/10.1191/0959683605hl816rp>
31. Anderson H, Hepburn A. Variation of humic substances within peat profile. In: *Peat and Water*. Fichsman CH, editor. New York: Academic press; 1986. p. 177-194.
32. Milori DM, Neto LM, Bayer C, Mielniczuk J, Bagnato VS. Humification degree of soil humic acids determined by fluorescence spectroscopy. *Soil Science*. 2002;11(177):739-749. doi: <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-200211000-00004>
33. Martynova NA. Khimiya pochv: organicheskoe veshchestvo pochv [Soil Chemistry: soil organic matter]. Irkutsk: Irkutsk State University Press; 2011. 257 p. In Russian
34. Calderoni G, Shnitzer M. Effect of age on the chemical structure of paleosol humic acids and fulvic acids. *Geochemica and Cosmochemica Acta*. 1984;48:2045-2051. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90385-5](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037(84)90385-5)

Received 23 April 2014;

Accepted 25 June 2014

Veretennikova EE, Kurina IV, Il'ina AA., Savel'ev VV. Palaeoenvironmental reconstruction of a Holocene peat bog ridge-hollow complex in the south of West Siberia. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya – Tomsk State University Journal of Biology*. 2014;3(27):6-22. doi: 10.17223/19988591/27/1 In Russian, English summary.