

ЭКОЛОГИЯ

УДК 551.794:551.583.7
doi: 10.17223/19988591/42/12

**И.В. Курьина, Е.Э. Веретенникова, Е.А. Головацкая,
Т.А. Бляхарчук, С.В. Смирнов**

*Институт мониторинга климатических и экологических
систем СО РАН, г. Томск, Россия*

Динамика уровня обводненности болот в южнотаежной подзоне Западной Сибири в среднем и позднем голоцене

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-45-703003/р_мол_а.

Проведен сравнительный анализ динамики уровня обводненности болот в голоцене. Материал для анализа – четыре торфяные колонки, отобранные на разных болотах на территории южной тайги Западной Сибири. Для трех выполнена количественная реконструкция уровня болотных вод по данным ризоподного анализа торфа при помощи трансферной функции. На одном из болот осуществлена реконструкция атмосферных осадков по палинологическим данным информационно-статистическим методом Климанова. Выделены 6 этапов синхронного повышения уровня обводненности большинства исследованных болот за последние 8500 лет: 8500–8400, 5700–5600, 5200–4600, 2600–2300, 1300–1100, 900–700 л.н., и 11 этапов синхронного для большинства болот уменьшения обводненности: 6700–6600, 6100–6000, 4600–4400, 4300–4100, 4000–3800, 3500–3400, 3200–3000, 2700–2600, 2100–1900, 1500–1300, 1100–900 л.н. Эти этапы согласуются с соответствующими изменениями количества атмосферных осадков. Полученные результаты свидетельствуют о высокой чувствительности исследованных торфяных отложений как верховых, так и низинного болот к колебаниям климата в голоцене.

Ключевые слова: *ризоподный анализ; раковинные амебы; спорово-пыльцевой анализ; реконструкция; палеоклимат; палеоэкология.*

Введение

Территория Западной Сибири имеет высокую степень заболоченности, достигающую в отдельных зонах 70% площади [1]. Болота начали формироваться в голоцене, возраст торфяных отложений варьирует, их образование происходит до сих пор. Наиболее древние торфяные залежи болот на территории Западной Сибири имеют возраст 8–10 тыс. лет [2]. Палеоэкологический анализ болотных отложений позволяет проследить основные этапы их развития в прошлом и использовать эти данные для мониторинга окружа-

ющей среды и прогнозирования состояния территории Западно-Сибирской равнины.

На юге таежной зоны распространены как верховые, так и низинные болота. Заболоченность достигает 40% территории [1]. Исследования болот на обширной территории Западно-Сибирской равнины массово проводились во второй половине XX в. и были направлены в основном на выявление основных этапов развития болот и их олиготрофизации в течение голоцена [2]. Реконструкция условий формирования торфяных отложений болот и климата велась преимущественно при помощи спорово-пыльцевых данных и анализа растительных остатков в торфе [3–5].

В последние два-три десятилетия активно развиваются новые современные методы палеоэкологических исследований. Среди них все больше возрастает роль метода ризоподного анализа торфа. Свою особую значимость он приобрел после разработки на его основе методики количественной реконструкции уровня болотных вод (УБВ) в процессе формирования торфяных отложений болот [6].

В настоящее время метод ризоподного анализа активно применяется в составе комплексных палеоэкологических исследований, в основном на верховых болотах [7–9]. Это обусловлено тем, что верховые болота питаются преимущественно атмосферными осадками, поэтому реконструкция их уровня обводненности напрямую связана с реконструкцией количества поступающих осадков как одной из основных характеристик климата [10–12]. Необходимо отметить, что сведения о чувствительности к воздействию климата других типов болот, кроме верховых, единичны. Обнаружена климатическая чувствительность сфагновых болот, заполняющих бессточные котловины в рельефе [13], и небольших горных болот, расположенных на границе водораздела или на водоразделе небольшой площади [14]. Этот вопрос до сих пор проработан довольно слабо и требует дальнейшего изучения.

В силу биологических и физиологических особенностей раковинных амёб анализ их остатков в торфе позволяет реконструировать условия локальной обводненности болота в точке отбора торфяной колонки, которые не рекомендуется экстраполировать на все болото в целом. Однако синхронные изменения уровня обводненности болот в процессе их развития, полученные при анализе разных торфяных колонок в одном районе исследования, вряд ли являются случайными и, наиболее вероятно, обусловлены колебаниями климата при отсутствии влияния других внешних факторов регионального масштаба (изменение рельефа территории и, соответственно, гидрологической сети, антропогенная деятельность) [14]. В таком случае применение методов реконструкции локальных условий среды позволяет исследовать динамику регионального климата в голоцене [15].

Территория южнотаежной подзоны Западной Сибири находится на южной границе зоны избыточного увлажнения [1]. Поэтому болота данной территории очень чувствительны к колебаниям климата и потенциально

являются перспективными объектами палеоклиматических реконструкций, особенно уровня атмосферных осадков [16–17].

К настоящему времени накоплены данные палеоэкологических реконструкций УБВ на основе ризоподного анализа для нескольких разных болот на территории южной тайги Западной Сибири [18–20], что позволяет нам сделать обобщение полученных результатов и сравнить динамику уровня обводненности этих болот в голоцене. Цель нашей работы – выявление синхронных изменений уровня обводненности на разных болотах в пределах одного региона в голоцене и поиск соответствия региональным палеоклиматическим изменениям.

Материалы и методики исследования

Район исследования относится к южнотаежной подзоне Западной Сибири (рис. 1). Объектами являются четыре торфяных колонки, отобранные на разных болотных массивах (табл. 1, 2).

Болота Самара и Бакcharское (мочажина грядово-мочажинного комплекса (ГМК)) расположены в 10 км одно от другого. Болото Темное находится в 130 км на востоке от них, а болото Петропавловское – в 180 км на северо-востоке и фактически расположено на границе подзон южной и средней тайги (рис. 1).

Исследованные болота отличаются друг от друга положением в рельефе и связанными с этим гидрологическими особенностями, степенью обводненности поверхности. Так, болото Бакcharское занимает территорию водораздела, а болота Темное, Самара, Петропавловское расположены на речных террасах.

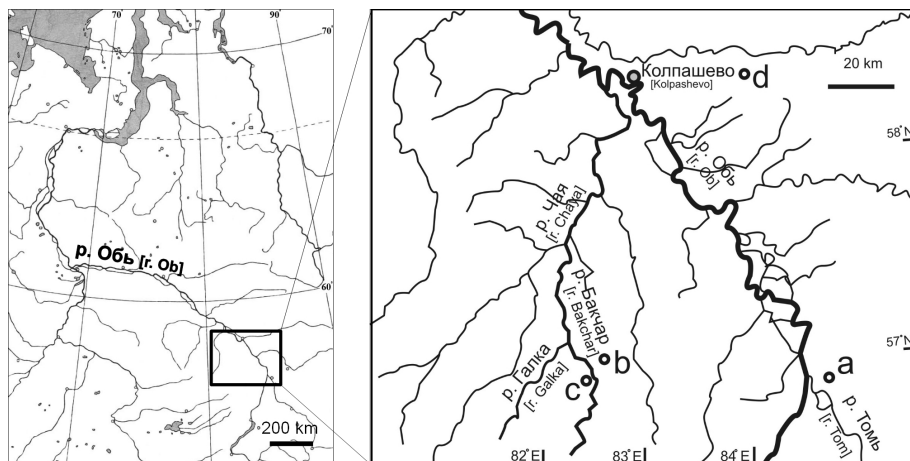


Рис. 1. Карта района исследований и точки отбора торфяных колонок:
условные обозначения болот см. в табл. 1

[Fig. 1. Geographical position of the study area and places of the peat core selection: mire codes are as in Table 1]

Т а б л и ц а 1 [Table 1]

Характеристика исследованных болот и их отложений
[Studied mires and their peat deposits]

Условное обозначение [Mire code]	Название болота (код торфяной колонки), координаты [Mire name (code of peat core), coordinates]	Тип болота и геоморфологическое положение [Mire type and its geomorphic position]	Мощность торфяных отложений, см [Thickness of peat deposit, cm]	Возраст торфяных отложений, лет [Age of peat, yr BP]	Возраст перехода болота в олиготрофную стадию развития, л.н. [Age of ombrotrophic mire stage, yr BP]
a	Темное (Т-16) [Temnoye (T-16)], 56°52'43"N 84°40'04"E	Верховое террасное [Ombrotrophic, on the terrace in the river valley]	445	9200	7600
b	Бакчарское, мочажина ГМК (ГМКМ-1) [Bakcharsky, hollow of the ridge-hollow complex (RHCH-1)], 56°58'47"N 82°36'50"E	Верховое водораздельное [Ombrotrophic, watershed]	290	5 500	1300
c	Самара (С-2) [Samara (S-2)], 56°55'23"N 82°30'43"E	Низинное террасное [Minerotrophic, on the floodplain terrace]	350	8 400	—
d	Петропавловское (П-1) [Petropavlovskoye (P-1)], 58°20'00"N 84°00'00"E	Верховое террасное [Ombrotrophic, on the terrace in the river valley]	425	10 700	5300

Т а б л и ц а 2 [Table 2]

Данные радиоуглеродного датирования торфяных отложений исследованных болот
[Radiocarbon dates of the studied peat cores]

Лабораторный номер [Lab. No.]	Датируемый материал [Dated material]	Условное обозначение болота* [Mire code*]	Глубина, см [Depth, cm]	Возраст ¹⁴ C, л.н. [Age ¹⁴ C yr BP]	Калиброванный возраст, л.н. (1 сигма) [Age cal yr BP (1 σ)]	Вероятность [Probability]
ИМКЭС-14С1136	Торф [Peat]	a	80–85	1870 ±107	1812 (1695–1928)	0,95
ИМКЭС-14С1130	Торф [Peat]		125–130	2544 ±91	2567 (2490–2644)	0,62

Продолжение табл. 2 [Table 2 (continuation)]

Лабораторный номер [Lab. No.]	Датируемый материал [Dated material]	Условное обозначение болота* [Mire code*]	Глубина, см [Depth, cm]	Возраст ¹⁴ C, л.н. [Age ¹⁴ C yr BP]	Калиброванный возраст, л.н. (1 сигма) [Age cal yr BP (1 σ)]	Вероятность [Probability]
ИМКЭС-14С1128	Торф [Peat]	а	165–170	3253 ±104	3482 (3370–3593)	0,99
ИМКЭС-14С1126	Торф [Peat]		185–190	3658 ±109	3971 (3841–4101)	0,90
ИМКЭС-14С1137	Торф [Peat]		240–245	4274 ±94	4887 (4800–4973)	0,66
ИМКЭС-14С1135	Торф [Peat]		260–265	4650 ±115	5386 (5284–5488)	0,72
ИМКЭС-14С1125	Торф [Peat]		320–325	5550 ±120	6374 (6267–6481)	0,91
ИМКЭС-14С1131	Торф [Peat]		380–385	6596 ±80	7476 (7433–7519)	0,75
ИМКЭС-14С1134	Торф [Peat]		405–410	7359 ±104	8132 (8046–8217)	0,74
ИМКЭС-14С1127	Торф [Peat]		440–445	8212 ±133	9165 (9015–9315)	0,90
ИМКЭС-211	Торф [Peat]	b	50–60	102 ±20	240 (224–255)	0,33
ИМКЭС-213	Торф [Peat]		130–140	889 ±40	770 (740–800)	0,56
ИМКЭС-80	Торф [Peat]		180–190	1740 ±60	1640 (1569–1711)	1,00
ИМКЭС-214	Торф [Peat]		200–210	2544 ±40	2722 (2698–2746)	0,49
СОАН-7876	Торф [Peat]		240–250	2820 ±70	2927 (2846–3007)	0,92
СОАН-7877	Торф [Peat]		280–290	4770 ±80	5526 (5462–5590)	0,82
ИМКЭС 78	Торф [Peat]	c	60–70	3045 ±40	3237 (3207–3267)	0,52
ИМКЭС 69	Торф [Peat]		170–180	3865 ±40	4272 (4238–4305)	0,50
ИМКЭС 72	Торф [Peat]		210–220	4255 ±40	4842 (4820–4863)	0,89
ИМКЭС 73	Торф [Peat]		270–280	4740 ±40	5544 (5507–5581)	0,64
СОАН-7879	Торф [Peat]		340–350	7620 ±130	8442 (8321–8563)	0,97
ГИН-3043	Торф [Peat]	d	195–200	4000 ±120	4457 (4287–4627)	0,92
ГИН-5520	Торф [Peat]		248–252	4590 ±140	5339 (5211–5467)	0,63
ГИН-5521	Торф [Peat]		340–342	5290 ±120	6065 (5934–6195)	1,00
ГИН-3042	Торф [Peat]		400–405	8150 ±100	9134 (8996–9272)	1,00

Окончание табл. 2 [Table 2 (end)]

Лабораторный номер [Lab. No.]	Датируемый материал [Dated material]	Условное обозначение болота* [Mire code*]	Глубина, см [Depth, cm]	Возраст ¹⁴ C, л.н. [Age ¹⁴ C yr BP]	Калиброванный возраст, л.н. (1 сигма) [Age cal yr BP (1 σ)]	Вероятность [Probability]
ГИН-5518	Суглинок с примесью торфа [Loam with peat]	d	425–430	9450 ±100	10676 (10556–10796)	0,77

Примечание. * Условные обозначения болот приведены те же, что в табл. 1.

[Note. *Mire codes are as in Table 1].

При этом мочажина ГМК Бакчарского болота, занятая в настоящее время топяной шейхцерицево-сфагновой растительностью, и низинное кустарничково-осоково-гипновое болото Самара отличаются высокой степенью обводненности поверхности по сравнению с более дренированными верховыми болотами Темное и Петропавловское, занятыми в настоящее время сосново-кустарничково-сфагновыми растительными сообществами (рямами).

Количественная реконструкция уровня обводненности (показатель глубины уровня болотных вод (УБВ)) осуществлялась на основе данных ризоподного анализа торфяных отложений болот Бакчарское, Темное, Самара при помощи двух моделей трансферных функций, разработанных авторами для района исследования. Разработка моделей выполнена в программном приложении R [21] с использованием дополнительных пакетов «gioja» [22] и «vegan» [23–24]. Материалом для разработки моделей послужили данные по современным сообществам раковинных амёб, населяющих болота южнотажной подзоны Западной Сибири. Всего отобрано 67 проб мохового очеса с поверхности болот на Бакчарском болотном массиве в условиях олиготрофных болотных экосистем и 45 проб – на болоте Самара и окраине Бакчарского болота в условиях эвтрофных и мезотрофных болотных экосистем. Во время экспедиции (сентябрь 2008 г.) в каждой точке отбора проб измерялась глубина уровня болотных вод относительно головок сфагновых мхов с помощью рулетки. Далее в лабораторных условиях пробы готовили к ризоподному анализу по стандартной методике [20], проведены также измерения pH и зольности этих проб [20].

Ризоподный анализ в пробах торфа выполнен аналогично исследованию современных сообществ раковинных амёб с применением такой же методики подготовки проб к анализу. Шаг отбора проб в исследованных торфяных колонках различался. В колонке болота Самара он равен 10 см, на болоте Темное – 5 см, в мочажине Бакчарского болота – 5 см (проанализирована каждая вторая проба торфа), на болоте Петропавловское – 2–3 см (пробы проанализированы выборочно по глубине отложений).

Важно отметить, что данные ризоподного анализа торфяных колонок опубликованы ранее для мочажины грядово-мочажинного комплекса Бакчарского болота в [18], болота Темное – в [19], болота Самара – в [20] и остались без изменений. Однако результаты реконструкции глубины уровня болотных вод в рамках данного исследования пересчитаны при помощи усовершенствованных моделей трансферных функций и потому отличаются от ранее опубликованных [18–20]. Кроме того, возраст торфяных отложений болота Темное в данной работе изменен в связи с полученными новыми радиоуглеродными датами для этого объекта (табл. 2).

В сравнительный анализ также вовлечены данные реконструкции палеоклимата (годовое количество осадков), рассчитанные по результатам палинологического анализа торфяной колонки, взятой на болоте Петропавловское [5]. Для расчетов использован информационно-статистический метод Климанова [25]. Важно отметить, что в нашей работе палеоклиматическая кривая по годовому количеству осадков представлена на шкале калиброванного возраста и поэтому несколько отличается от более ранних публикаций [26–27].

Для синхронизации изменений уровня обводненности болот использован возраст торфяных отложений, полученный на основе углеродного датирования отдельных слоев торфа и калиброванный в специальном программном приложении [28] в системе счисления «от настоящего времени» (за нулевую точку отчета принят 1950 г.) (см. табл. 2). На основании полученных дат рассчитан возраст остальных слоев торфа. Временные границы известных периодов голоцена [29] также выделены с учетом калиброванного возраста. Временное разрешение проведенных реконструкций вычислено как отношение количества калиброванных лет, соответствующего определенному слою торфа между датированными образцами, к количеству исследованных проб в этом слое залежи.

Анализ изменений обводненности болот проведен с временным шагом в 100 лет за период 8500 лет. Уровень обводненности в каждой заданной точке определен, с одной стороны, относительно полученного значения УБВ выше или ниже среднего уровня для данного болота, с другой стороны, относительно тенденции уменьшения или увеличения увлажненности по сравнению с более древним слоем торфа. При построении графиков динамики уровня обводненности болот каждое значение УБВ в торфяных колонках приведено по среднему, а не максимальному возрасту пробы торфа, т.е. соответствует средней глубине исследованного слоя торфа (пробы), а не его нижней границе. Например, для слоя торфа, формировавшегося в период 650–550 л.н., точка на графике соответствует возрасту 600 лет. Это сделано для более успешной синхронизации данных разных торфяных залежей, в которых торф накапливался с разной скоростью.

Результаты исследования

Для реконструкции УБВ в торфяных отложениях болот нами разработано две модели трансферных функций для торфа разного типа на основании изучения современных сообществ болотных раковинных амёб и их экологических свойств в южнотаежной подзоне Западной Сибири.

Первая модель трансферной функции разработана для реконструкции УБВ в торфе верхового типа на основе данных 67 проб мохового очеса, отобранных с поверхности Бакчарского верхового болотного массива. В данных пробах очеса проанализированы видовой состав и структура современных сообществ раковинных амёб и проведены измерения глубины уровня болотных вод, pH и зольности. Всего в пробах олиготрофных болотных местообитаний выявлено 83 вида и внутривидовых таксона раковинных амёб. Наибольшего относительного обилия от общего количества достигают виды: *Phryganella acropodia* v. *austratica* (16%), *Trinema lineare* (10%), *Assulina muscorum* (9%), *Schoenbornia smithi* (8%), *Hyalosphenia elegans* (6%) и *Nebela militaris* (4%). В разработку модели трансферной функции вовлечены 60 видов раковинных амёб, которые встречались в 4 и более пробах с поверхности верховых болот, а остальные виды исключены из расчетов. Виды *Archerella flavum*, *Diffugia leidy*, *Physochila (Nebela) tenella*, *Phryganella hemisphaerica* расположились в правой части (чуть ниже середины) графика ординации RDA и являются индикаторами наиболее обводненных условий, а виды *Assulina muscorum*, *Corythion dubium*, *Trinema lineare*, *T. complanatum* расположились в левой части (чуть выше середины) графика и индицируют наиболее сухие условия (рис. 2, а). Анализ избыточности RDA подтвердил значимое ($p < 0,05$) и лимитирующее влияние переменной УБВ на сообщества раковинных амёб (на графике вектор переменной УБВ имеет наименьший угол с первой осью RDA), что позволяет нам применять эти данные для разработки модели трансферной функции и последующей количественной палеогидрологической реконструкции (см. рис. 2, а). В разработке модели использована трансферная функция взвешенного осреднения. Оценка валидации данной модели методом перекрестной проверки с исключением по одному образцу («leave-one-out») показала, что среднеквадратичные остатки прогнозирования (RMSEP) составляют 13 см, а коэффициент корреляции между измеренными в полевом исследовании и предсказанными моделью значениями УБВ равенется 0,68 (рис. 3, а). Для совершенствования предсказательной силы модели из анализа исключены 20 проб с максимальными отклонениями предсказанных значений УБВ от измеренных, превышающими 13 см (это пороговое значение рассчитано как 20% от общего диапазона измеренных в поле значений УБВ, от –18 см до 45 см). Оставшиеся 47 проб легли в основу разработки сокращенной модели. Оценка ее валидации методом «leave-one-out» показала, что среднеквадратичные остатки прогнозирования (RMSEP) уменьшились до 8 см, а коэффициент корреляции составил 0,58 (рис. 3, б).

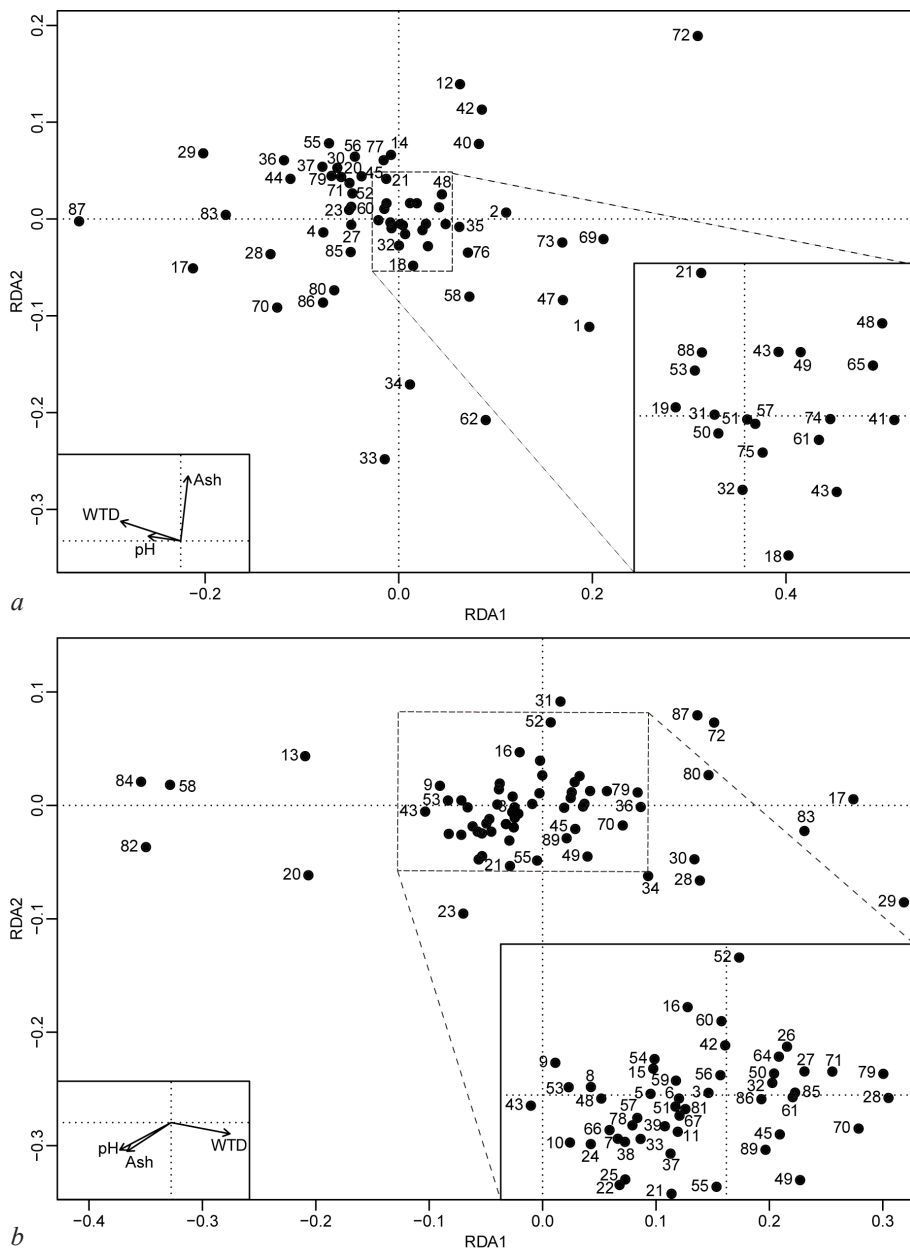


Рис. 2. Ординация видов раковинных амёб по результатам анализа избыточности

RDA в выборках *a* – верховых и *b* – низинных и переходных болот

[Fig. 2. Ordination of testate amoeba species according to redundancy analysis in data sets from *a* ombrotrophic and *b* minerotrophic mires]:

WTD – уровень болотных вод [Water-table depth]; Ash – зольность субстрата [Ash content];
 1 – *Archerella flavum* Archer, 1877; 2 – *Amphitrema wrightianum* Archer, 1869; 3 – *Arcella arenaria* Greeff, 1866; 4 – *Arcella catinus* Penard, 1890; 5 – *Arcella dentata* Ehrenberg, 1830;

6 – *Arcella discoides* Ehrenberg, 1843; 7 – *Arcella discoides* v. *scutelliformis* Playfair, 1918; 8 – *Arcella gibbosa* Penard, 1890; 9 – *Arcella gibbosa* v. *laevis* Deflandre, 1928; 10 – *Arcella hemisphaerica* Perty, 1852; 11 – *Arcella intermedia* v. *laevis* (Deflandre, 1928) Tsyganov, Mazei, 2006; 12 – *Arcella rotundata* Playfair, 1918; 13 – *Arcella rotundata* v. *stenostoma* Deflandre, 1928; 14 – *Arcella rotundata* v. *stenostoma undulata* Deflandre, 1928; 15 – *Arcella vulgaris* Ehrenberg, 1830; 16 – *Arcella vulgaris* v. *polymorpha* Deflandre, 1928; 17 – *Assulina muscorum* Greeff, 1888; 18 – *Assulina seminulum* (Ehrenberg, 1848) Leidy, 1879; 19 – *Bullinularia indica* v. *minor* (Penard, 1911) Deflandre, 1953; 20 – *Centropyxis aculeata* (Ehrenberg, 1838) Stein, 1857; 21 – *Centropyxis aerophila* Deflandre, 1929; 22 – *Centropyxis ohridensis* Golemansky, 1967; 23 – *Centropyxis constricta* v. *minima* Decloitre, 1954; 24 – *Centropyxis ecornis* (Ehrenberg, 1841) Leidy, 1879; 25 – *Centropyxis elongata* (Penard, 1890) Thomas, 1959; 26 – *Centropyxis gibba* v. *inermis* Bartoš, 1940; 27 – *Centropyxis laevigata* Penard, 1890; 28 – *Corythion delamarei* Bonnet et Thomas, 1960; 29 – *Corythion dubium* Taránek, 1881; 30 – *Corythion orbicularis* (Penard, 1910) Iudina, 1996; 31 – *Corythion pulchellum* Penard, 1890; 32 – *Cryptodiffugia bassini* Bobrov, 2001; 33 – *Cryptodiffugia* cf. *voigti* Schmidt, 1926; 34 – *Cryptodiffugia* (*Diffugiella*) *minuta* Playfair, 1917; 35 – *Cryptodiffugia sacculus* v. *sakotschawi* Tarnogradski, 1959; 36 – *Cyclopyxis eurystoma* Deflandre, 1929; 37 – *Cyclopyxis eurystoma* v. *parvula* Bonnet et Thomas, 1960; 38 – *Cyclopyxis kahli* Deflandre, 1929; 39 – *Cyphoderia ampulla* (Ehrenberg, 1840) Leidy, 1879; 40 – *Diffugia angulostoma* Gauthier-Lievre et Thomas, 1958; 41 – *Diffugia bacillifera* Penard, 1890; 42 – *Diffugia bacilliarum* Perty, 1849; 43 – *Diffugia globulosa* Dujardin, 1837; 44 – *Diffugia globulus* (Ehrenberg, 1848) Hopkinson, 1909; 45 – *Cryptodiffugia* (*Diffugiella*) *oviformis* Penard, 1902; 46 – *Cryptodiffugia* (*Diffugiella*) *oviformis* f. *fusca* Penard, 1890; 47 – *Diffugia leidy* Wailes, 1912; 48 – *Diffugia penardi* (Penard, 1890) Hopkinson, 1909; 49 – *Euglypha anodonta* v. *magna* Schönborn, 1964; 50 – *Euglypha compressa* Carter, 1864; 51 – *Euglypha compressa* f. *glabra* Wailes, 1915; 52 – *Euglypha cristata* Leidy, 1879; 53 – *Euglypha cristata* v. *decora* Jung, 1942; 54 – *Euglypha filifera* Penard, 1890; 55 – *Euglypha rotunda* Wailes, 1915; 56 – *Euglypha strigosa* (Ehrenberg, 1871) Leidy, 1878; 57 – *Euglypha strigosa* f. *glabra* Wailes, 1928; 58 – *Euglypha tuberculata* Dujardin, 1841; 59 – *Heleopera petricola* Leidy, 1879; 60 – *Heleopera petricola* v. *amethystea* Penard, 1902; 61 – *Heleopera sylvatica* Penard, 1890; 62 – *Hyalosphenia elegans* Leidy, 1879; 63 – *Hyalosphenia papilio* Leidy, 1875; 64 – *Nebela bohémica* Taránek, 1882; 65 – *Nebela carinata* (Archer, 1867) Kosakyan et al., 2016; 66 – *Nebela collaris* (Ehrenberg, 1848) sensu Kosakyan et Goma, 2013; 67 – *Argynnia* (*Nebela*) *dentistoma* (Penard, 1890); 68 – *Gibbocarina* (*Nebela*) *galeata* (Penard, 1890) Kosakyan et al., 2016; 69 – *Physochila* (*Nebela*) *tenella* Penard, 1893; 70 – *Nebela militaris* Penard, 1890; 71 – *Nebela tincta* (Leidy, 1879) sensu Kosakyan et Lara, 2012; 72 – *Phryganella acropodia* v. *australica* Playfair, 1917; 73 – *Phryganella hemisphaerica* Penard, 1902; 74 – *Placocista jurassica* Penard, 1905; 75 – *Placocista lens* Penard, 1899; 76 – *Placocista spinosa* (Carter, 1865) Leidy, 1879; 77 – *Pseudodiffugia gracilis* v. *terricola* Bonnet et Thomas, 1960; 78 – *Quadrullella symmetrica* (Wallich, 1863) Kosakyan et al., 2016; 79 – *Schoenbornia humicola* (Schönborn, 1964) Decloitre, 1964; 80 – *Schoenbornia smithi* Beyens et Chardez, 1997; 81 – *Sphenoderia lenta* Schlumberger, 1845; 82 – *Tracheleuglypha dentata* Deflandre, 1938; 83 – *Trinema complanatum* Penard, 1890; 84 – *Trinema enchelys* (Ehrenberg, 1838) Leidy, 1878; 85 – *Trigonopyxis arcula* (Leidy, 1879) Penard, 1912; 86 – *Trigonopyxis minuta* Schönborn et Peschke, 1988; 87 – *Trinema lineare* Penard, 1890; 88 – *Trinema lineare* v. *truncatum* Chardez, 1964; 89 – *Trinema penardi* Thomas et Chardez, 1958

Вторая модель трансферной функции использована для реконструкции УБВ в слоях торфа переходного и низинного типов. Она разработана на ос-

нове выборки 45 проб мохового очеса, взятых с поверхности низинного болота Самара и переходного заболоченного участка леса на окраине Бакчарского болотного массива. В исследованных пробах с поверхности этих болот выявлено 120 видов и внутривидовых таксонов раковинных амеб. Доминантами являются виды *Trinema lineare* (25% от общего количества), *T. enchelys* (16%), *Euglypha rotunda* (10%), *Tracheleuglypha dentata* (5%), *Assulina muscorum* (4%) и *Centropyxis aerophila* (2%). В разработку модели трансферной функции вовлечены 65 видов раковинных амеб, которые встречались в 4 и более пробах с поверхности низинных и переходных болот, а остальные виды исключены из расчетов. Виды *Arcella rotundata* v. *stenostoma*, *Centropyxis aculeata*, *Euglypha tuberculata*, *Tracheleuglypha dentata*, *Trinema enchelys* являются индикаторами наиболее обводненных условий (расположены в левой части графика чуть выше середины на рис. 2, b), а виды *Assulina muscorum*, *Corythion dubium*, *Trinema complanatum* – индикаторы наиболее сухих условий (расположены в правой части графика чуть ниже середины на рис. 2, b). Проведенный анализ избыточности RDA показал статистически значимое влияние ($p < 0,05$) переменной УБВ на данные по современным сообществам раковинных амеб, сопоставимое с влиянием переменной pH (векторы обеих переменных расположены под сходным небольшим углом по отношению к главной оси RDA на рис. 2, b). Это означает, что мы можем использовать и переменную УБВ, и переменную pH для разработки модели трансферной функции. В нашем исследовании наибольший интерес представляла переменная УБВ. Для реконструкции уровня обводненности болота использована модель трансферной функции с взвешенным осреднением. При оценке точности расчета УБВ в этой модели методом перекрестной проверки показано, что RMSEP составляет 8 см, а коэффициент корреляции – 0,84 (рис. 3, c). Для совершенствования предсказательной силы модели из анализа удалено семь проб с максимальными отклонениями предсказанных значений УБВ от измеренных, превышающими 10 см (общий диапазон измеренных в поле значений УБВ составил от –11 см до 39 см). Сокращенная модель рассчитана по данным оставшихся 38 проб. Оценка ее валидации методом «leave-one-out» показала, что среднеквадратичные остатки прогнозирования (RMSEP) уменьшились до 7 см, а коэффициент корреляции стал равен 0,92 (рис. 3, d).

Для реконструкции УБВ в исследованных торфяных колонках применены усовершенствованные сокращенные модели трансферных функций, разработанные отдельно для торфа верхового типа и низинного и переходного типов.

Возраст торфяных отложений исследованных болот различался. Формирование торфяной залежи на болоте Темное началось 9 200 л.н., на болоте Самара – 8 450 л.н., в мочажине Бакчарского болота – 5 500 л.н., а на болоте Петропавловское – 10 700 л.н. (см. табл. 2, рис. 4).

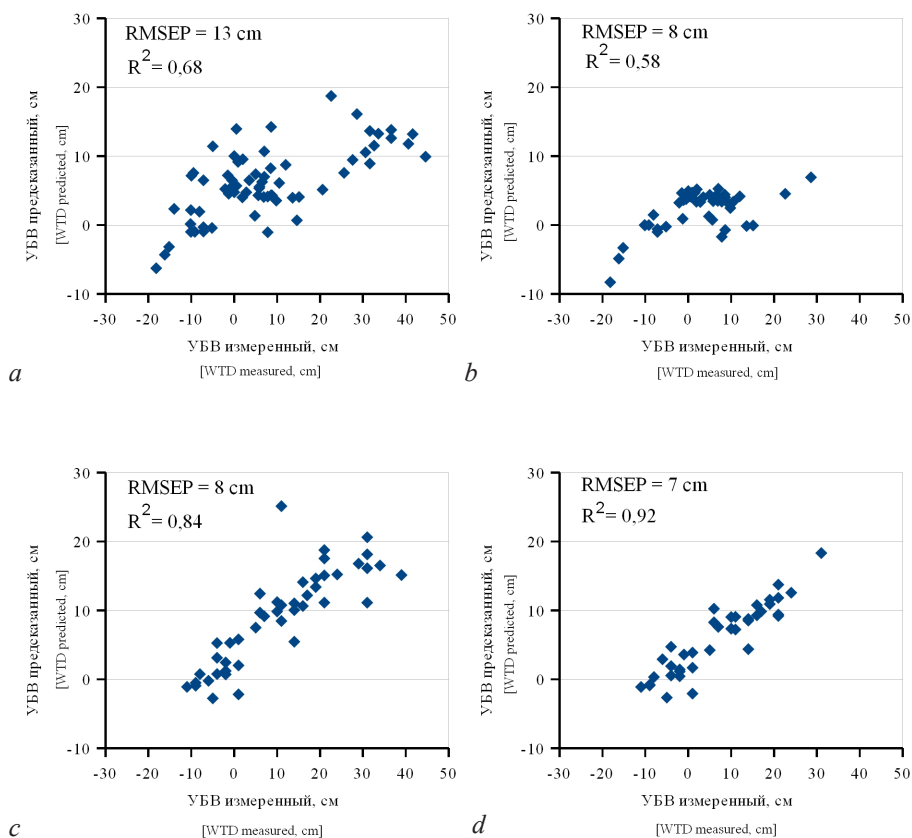


Рис. 3. Соотношение значений глубины уровня болотных вод (УБВ), измеренных в полевых условиях и предсказанных с помощью модели трансферной функции взвешенного среднего для *a* – полной и *b* – сокращенной выборки данных с верховых болот и для *c* – полной и *d* – сокращенной выборки низинных и переходных болот: RMSEP – среднеквадратичные остатки прогнозирования; R^2 – коэффициент корреляции [Fig. 3. The ratio of the water-table depth (WTD) values measured in the field and predicted using the transfer function model of a weighted average in *a* full and *b* reduced data set from ombrotrophic mires and in *c* full and *d* reduced data set from minerotrophic mires: RMSEP - Root Mean Squared Error of Prediction, R^2 - Correlation coefficient]

Построенные глубинно-возрастные модели для исследованных торфяных колонок свидетельствуют о том, что торф накапливался неравномерно в процессе формирования болотных отложений, в большинстве случаев периоды замедления торфонакопления на разных болотах происходили неодновременно (рис. 4). Временное разрешение проведенных реконструкций уровня обводненности болот варьирует от 51 до 650 лет и в среднем составляет 193 года на мочажине Бакcharского болота, 104 года – на болоте Темное, 243 года – на болоте Самара и 188 лет – на болоте Петропавловское (рис. 5).

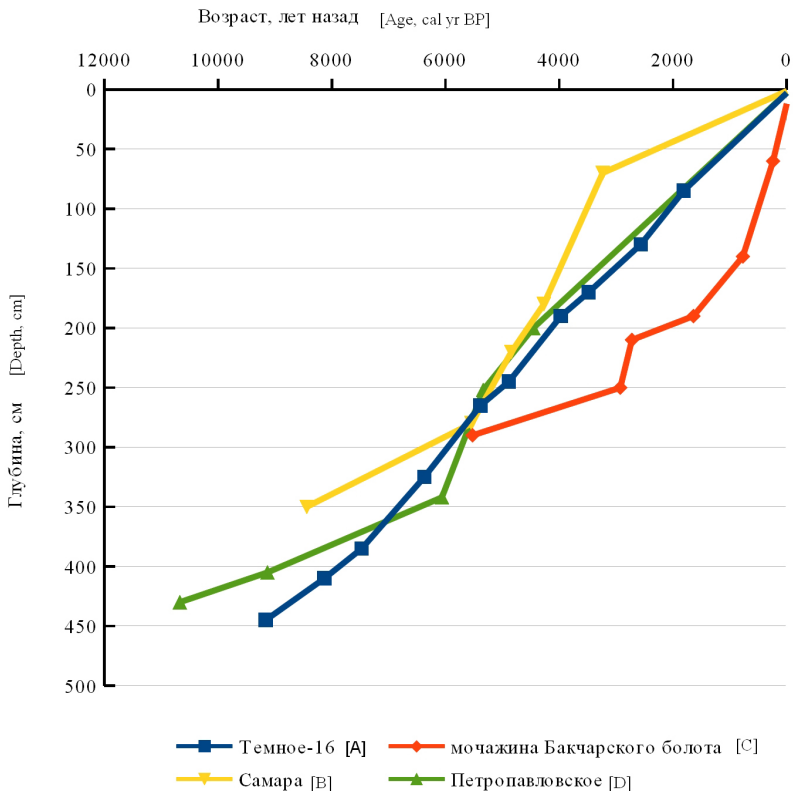


Рис. 4. Глубинно-возрастные модели исследованных торфяных колонок: условные обозначения болот см. в табл. 1
[Fig. 4. Age-depth models of the studied peat cores: mire codes are as in Table 1]

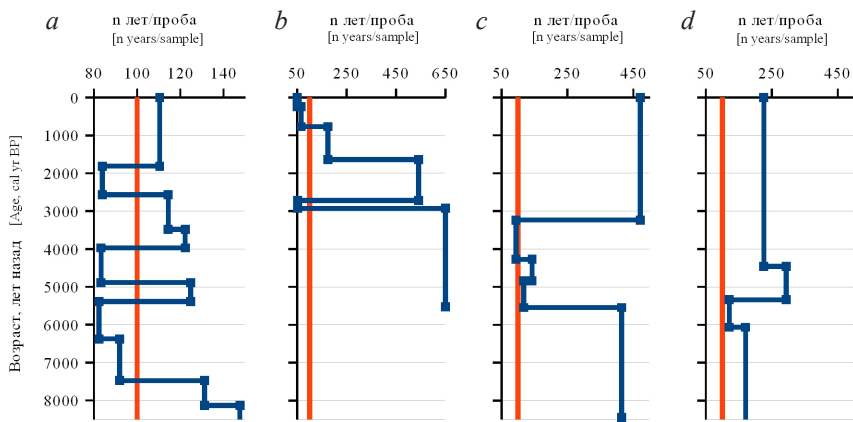


Рис. 5. Временное разрешение реконструкций на исследованных болотах: условные обозначения болот см. в табл. 1; красной линией выделено значение 100 лет/пробу
[Fig. 5. Time resolution of reconstructions from the studied mires: mire codes are as in Table 1; red lines show the level of 100 years per sample]

Реконструированная динамика УБВ на исследованных болотах показала, что общая амплитуда колебаний УБВ наименьшая на низинном болоте Самара (рис. 6, *c*); а болото Темное характеризовалось меньшим уровнем обводненности, по сравнению с болотами Самара и мочажина Бакчарского болота (см. рис. 6). Несмотря на выявленные различия, для нашей работы наибольший интерес представляла синхронность колебаний уровня обводненности на исследованных болотах независимо от амплитуды этих колебаний.

Сравнительный анализ исследуемых болот позволил выявить этапы наиболее контрастных синхронных изменений их обводненности за последние 8500 лет. Нами выделено 6 этапов синхронного повышения уровня обводненности большинства исследованных болот: 8500–8400, 5700–5600, 5200–4600, 2600–2300, 1300–1100, 900–700 л.н. (этапы В-1–В-6 на рис. 6) и 11 этапов обсыхания поверхности болот: 6700–6600, 6100–6000, 4600–4400, 4300–4100, 4000–3800, 3500–3400, 3200–3000, 2700–2600, 2100–1900, 1500–1300, 1100–900 л.н. (этапы С-1–С-11 на рис. 6).

Основное внимание в этой работе уделено именно синхронным изменениям уровня обводненности болот. Однако следует отметить, что кроме них наблюдались и отдельные колебания увлажненности, происходившие на одном-двух из исследуемых объектов. Так, кратковременное повышение уровня обводненности выявлено на мочажине Бакчарского болота около 500 л.н. (см. рис. 6, *b*), это соответствует и повышению количества осадков на палеоклиматической кривой (см. рис. 6, *d*), а на болоте Темном и Самара оно не проявилось. Другим примером может служить повышение уровня обводненности на болоте Темное и мочажине Бакчарского болота 2800 л.н. (см. рис. 6, *a, b*), которое не обнаружено в торфяной залежи болота Самара; а на палеоклиматической кривой осадков этот период соответствует сухим условиям климата (см. рис. 6, *d*).

Обсуждение результатов исследования

Результаты показали, что выделенные синхронные изменения уровня обводненности болот обусловлены колебаниями уровня атмосферных осадков в голоцене. Это подтверждается и их согласованностью с данными региональной палеоклиматической кривой по годовому количеству атмосферных осадков, напрямую отражающей флуктуации климата в голоцене (см. рис. 6, *d*). Установлено, что синхронные этапы изменений обводненности болот выявлены не только в то время, когда болота достигли олиготрофной стадии развития (см. табл. 1), но также и на предыдущих стадиях переходного и низинного болот. Таким образом, наши данные подкрепляют выводы других авторов [13, 14] о том, что к воздействию изменений климата могут быть чувствительны не только верховые болота, питание которых осуществляется преимущественно за счет атмосферных осадков.

Несинхронные изменения уровня обводненности болот могут быть вызваны преобладающим влиянием локальных особенностей эндогенного болотообразовательного процесса, экранирующим воздействие климата. Например, в процессе естественного нарастания торфяной залежи болота уменьшается влияние подпитывающих грунтовых вод на уровень его поверхностной увлажненности, также при этом за счет неравномерного изменения высоты залежи на всей площади болота может меняться и направление поверхностных гидрологических стоков. В приведенных нами примерах несинхронного повышения уровня обводненности отдельных изучаемых болот 2800 и 500 л.н. основной причиной отсутствия синхронности мы считаем низкое временное разрешение реконструкций в эти периоды. Так, фактическое отсутствие данных по уровню болотных вод 2800 л.н. на болоте Самара, Петропавловское, и 500 л.н. – на болоте Темное и Самара не позволяют нам судить об их обводненности в эти конкретные короткие временные интервалы.

Синхронизация изменений уровня обводненности болот в нашей работе оказалась осложнена по ряду причин. С одной стороны, мы проанализировали только три торфяных колонки, отобранные на очень разных по своим свойствам болотах. Если бы изучаемых объектов было больше, то мы могли бы с большей уверенностью говорить о синхронных изменениях уровня обводненности болот. Кроме того, увеличение количества исследованных болот, возможно, позволит прояснить климатические условия в отдельные столетия голоцена, которые оказались разнокачественными по уровню обводненности на выбранных объектах, либо, как минимум, обратить особое внимание на эти периоды.

С другой стороны, существенным препятствием для синхронизации динамики обводненности на разных болотах стало относительно низкое временное разрешение палеогидрологических реконструкций. Превышение временного разрешения более 100 лет в расчете на пробу торфа препятствовало нам определить уровень обводненности для каждого столетия в голоцене. Мы пришли к заключению, что чем выше временное разрешение (т.е. чем меньше его значение), тем больше вероятность того, что сравниваемые значения УБВ существовали на разных болотах одновременно, следовательно, тем больше объективность синхронизации данных разных объектов. Одним из способов решения задачи более высокого разрешения палеоэкологической реконструкции является уменьшение шага отбора проб по глубине торфяной залежи. Например, в современных работах зарубежных коллег отложения болот часто анализируются с шагом отбора проб 1–2 см [7–9, 13].

В целом результаты исследования позволили установить соответствие динамики обводненности изучаемых болот климатическим характеристикам отдельных периодов голоцена, выявленных для территории Западной Сибири [25].

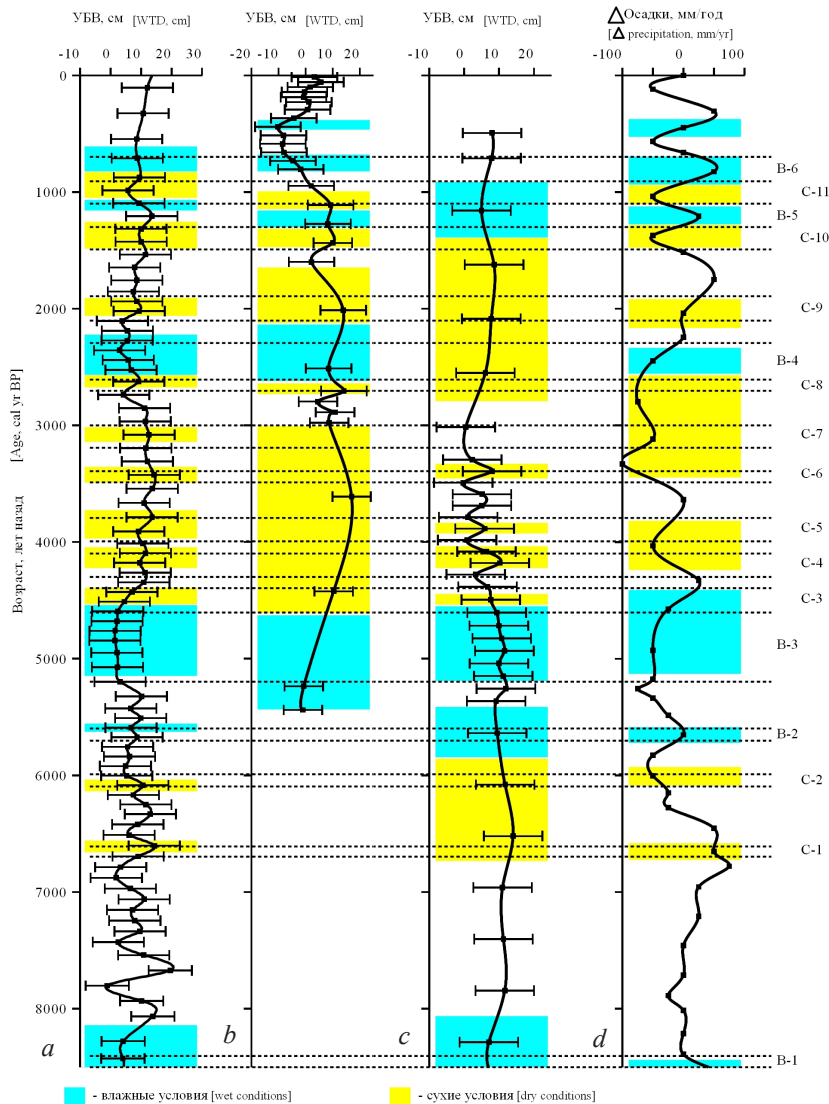


Рис. 6. Динамика УБВ и реконструированного количества осадков по данным анализа торфяных отложений болот: условные обозначения болот см. в табл. 1; пунктиром выделены этапы синхронного повышения УБВ и количества осадков (B-1–B-6) и этапы их синхронного снижения (C-1–C-11); границы погрешности значений УБВ выражены в виде среднеквадратичных остатков прогнозирования [Fig. 6. Dynamics of the reconstructed water-table depth and delta of annual precipitations based on the analysis from peat deposits of the studied mires: mire codes are as in Table 1; Dashed lines show periods of synchronous increasing of mire surface wetness and precipitations (from B-1 to B-6) and periods of their synchronous decreasing (from C-1 to C-11); error margins of WTD show RMSEP values]

В Атлантическом периоде (8800–5100 л.н.), характеризующемся более влажными и теплыми условиями, по сравнению с современными [25], уровень обводненности изучаемых нами болот был повышенным. Этому времени соответствуют выделенные нами преимущественно влажные синхронные этапы В-1–В-3 (см. рис. 6). Суббореальный период (5100–2600 л.н.) отличался более сухим и холодным климатом [25]. Результаты наших исследований также показали, что в это время преобладают выделенные синхронные сухие этапы С-3–С-8 (рис. 6). Для Субатлантического периода (2600–современность) характерны кратковременные резкие колебания влажности климата и температуры [25]. На исследованных нами болотах для этого времени выделены сменяющие один другой этапы повышения и снижения обводненности болот: В-4, С-9, С-10, В-5, С-11, В-6 (см. рис. 6).

Результаты наших исследований согласуются и с отдельными сведениями по палеоклимату и обводненности болот на юге таежной зоны Западной Сибири, полученными ранее другими авторами. Так периоды более влажных условий климата 5000–4500 и около 1200 л.н., выявленные Ф.З. Глебовым и Л.В. Карпенко [30] по данным спорово-пыльцевого анализа торфяной колонки на одном из болот в южной тайге Западной Сибири, соответствуют выделенным нами этапам В-3 и В-5 (см. рис. 6), а периоды более сухих климатических условий 3700–3600, 2800 и 1500 л.н. – выявленным нами этапам С-6, С-8 и С-10 (см. рис. 6). Также наши данные соответствуют результатам палеогидрологической реконструкции, выполненной на основе ризоподного анализа торфа одного из верховых болот, расположенных на юге таежной зоны Западной Сибири в подзоне березово-осиновых редколесий [9]. Выявленные в этом исследовании периоды повышения уровня обводненности болота 2500–2400, 1400–1300, 900–800 л.н. согласуются с выделенными нами этапами В-4, В-5, В-6; а периоды обсыхания поверхности болота 2000–1900, 1500, 1100–1000 л.н. согласуются с выделенными нами этапами С-9, С-10 и С-11 (рис. 6).

В динамике обводненности болот нашли свое отражение известные вековые осцилляции климата позднего голоцена [9]. Так, средневековый климатический оптимум (1250–800 л.н.) проявился в виде повышения уровня обводненности всех болот и сопровождался повышением количества осадков и температуры (этапы В-5 и В-6 на рис. 6). В течение этого периода отмечается кратковременное значительное обсыхание 1100–1000 л.н. [9], которое также проявилось в снижении уровня обводненности изучаемых нами болот (этап С-11 на рис. 6). Между тем малый ледниковый период (550–250 л.н.) проявился в виде увеличения уровня обводненности только на Бакчарском болоте (600–400 л.н.) и в виде увеличения количества атмосферных осадков – на Петропавловском болоте (500–400 л.н.).

Заключение

Выявлена согласованность динамики уровня обводненности разных болот в процессе их развития в голоцене на территории южной тайги Запад-

ной Сибири. Обнаруженные синхронные изменения уровня обводненности болот соответствуют ранее полученным реконструкциям динамики регионального палеоклимата и отражают колебания уровня атмосферных осадков в голоцене. Это свидетельствует о климатической чувствительности торфяных отложений и верховых болот, включая стадии переходного и низинного болота в процессе их развития, и исследованного низинного болота.

Ризоподный анализ, использованный в нашей работе для реконструкции уровня обводненности болот, хорошо зарекомендовал себя, так как выявил значительные колебания поверхностной влажности болот верхового и низинного типа в течение всей истории их развития. Данный анализ направлен на реконструкцию локальных условий увлажнения в точке отбора торфяной колонки, тем не менее при сравнении разных торфяных колонок, имеющих надежные возрастные модели, и обнаружении синхронных однонаправленных колебаний обводненности болот этот анализ позволяет нам судить об изменениях климата и при таком рассмотрении может служить альтернативой спорово-пыльцевому методу, а количественные реконструкции уровня болотных вод могут быть сопоставлены с реконструкцией палеоосадков; при этом данные одного анализа подтверждают данные другого.

Полученные в нашей работе результаты являются предварительными. В дальнейшем исследование планируется продолжить и включить в сравнительный анализ данные количественных палеоэкологических реконструкций других болот на территории южнотаежной подзоны Западной Сибири, а также повысить временное разрешение реконструкций. Это позволит уточнить и детализировать информацию о колебаниях климата векового и тысячелетнего масштаба на данной территории в голоцене. Высокое временное разрешение палеоэкологических реконструкций необходимо для более точной оценки динамики обводненности болот в целом и для выявления более мелких и кратковременных колебаний уровня обводненности, соизмеримых с современными изменениями природной среды и климата, которые наблюдаются в течение последних десятилетий.

Литература

1. Kremenetski K.V., Velichko A.A., Borisova O.K., MacDonald G.M., Smith L.C., Frey K.E. and Orlova L.A. Peatlands of the Western Siberian lowlands: current knowledge on zonation, carbon content and Late Quaternary history // *Quaternary Science Reviews*. 2003. № 22. PP. 703–723.
2. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение / отв. ред. В.Б. Куваев. Тула : Гриф и К, 2001. 584 с.
3. Лапшина Е.Д. Флора болот юго-востока Западной Сибири. Томск : Изд-во Том. ун-та, 2003. 294 с.
4. Borisova O.K., Novenko E.Yu., Zelikson E.M., Kremenetski K.V. Lateglacial and Holocene vegetational and climatic changes in the southern taiga zone of West Siberia according to pollen records from Zhukovskoye peat mire // *Quaternary International*. 2011. 237. PP. 65–73. doi: 10.1016/j.quaint.2011.01.015

5. Бляхарчук Т.А. Новые палинологические данные о динамике растительного покрова и климата Западной Сибири и прилегающих территорий в голоцене. Новосибирск : Гео, 2012. 139 с.
6. Warner B.G., Charman D.J. Holocene changes on a peatland in Northwestern Ontario interpreted from testate amoebae (*Protozoa*) analysis // *Boreas*. 1994. № 23. PP. 270–279.
7. Turner T.E., Swindles G.T., Roucoux K.H. Late Holocene ecohydrological and carbon dynamics of a UK raised bog: impact of human activity and climate change // *Quaternary Science Reviews*. 2014. № 84. PP. 65–85. doi: 10.1016/j.quascirev.2013.10.030
8. Lamentowicz M., Slowinski M., Marcisz K., Zielinska M., Kaliszan K., Lapshina E., Gilbert D., Buttler A., Fialkiewicz-Koziel B., Jassey V.E.J., Laggoun-Defarge F., Kolaczek P. Hydrological dynamics and fire history of the last 1300 years in western Siberia reconstructed from a high-resolution, ombrotrophic peat archive // *Quaternary Research*. 2015. № 84 (3). PP. 312–325. doi: 10.1016/j.yqres.2015.09.002
9. Willis K.S., Beilman D., Booth R.K., Amesbury M., Holmquist J., MacDonald G. Peatland paleohydrology in the southern West Siberian Lowlands: Comparison of multiple testate amoebae transfer functions, sites, and *Sphagnum* $\delta^{13}\text{C}$ values // *The Holocene*. 2015. № 25(9). PP. 1425–1436. doi: 10.1177/0959683615585833
10. Aaby B. Cyclic climatic variations in climate over the past 5,500 years reflected in raised bogs // *Nature*. 1976. № 263. PP. 281–284.
11. Charman D.J. Biostratigraphic and palaeoenvironmental applications of testate amoebae // *Quaternary Science Reviews*. 2001. № 20. PP. 1753–1764.
12. Mauquoy D., Engelkes T., Groot M.H.M., Markesteijn F., Oudejans M.G., van der Plicht J., van Geel B. High-resolution records of late-Holocene climate change and carbon accumulation in two north-west European ombrotrophic peat bogs // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2002. № 186. PP. 275–310.
13. Booth R.K. Testing the climate sensitivity of peat-based paleoclimate reconstructions in mid-continental North America // *Quaternary Science Reviews*. 2010. № 29. PP. 720–731. doi: 10.1016/j.quascirev.2009.11.018
14. Lavoie M., Pellerin S., Larocque M. Examining the role of allogeneous and autogenous factors in the long-term dynamics of a temperate headwater peatland (southern Quebec, Canada) // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2013. № 386. PP. 336–348. doi: 10.1016/j.palaeo.2013.06.003
15. Loisel J., Garneau M. Late Holocene paleoecohydrology and carbon accumulation estimates from two boreal peat bogs in eastern Canada: Potential and limits of multi-proxy archives // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2010. № 291. PP. 493–533. doi: 10.1016/j.palaeo.2010.03.020
16. Болота Западной Сибири, их строение и гидрологический режим / под ред. К.Е. Иванова, С.М. Новикова. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 448 с.
17. Ускова Л.М. Анализ связи заболоченности речных бассейнов с физико-географическими условиями таежной зоны Западной Сибири // *География и природные ресурсы*. 1982. № 2. С. 72–79.
18. Прейс Ю.И., Курьина И.В. Палеореконструкция высокого разрешения по данным комплексного исследования торфяных отложений южной тайги Западной Сибири // *Исследование природно-климатических процессов на территории Большого Васюганского болота* / отв. ред. М.В. Кабанов. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2012. С. 14–38.
19. Веретенникова Е.Э., Курьина И.В., Ильина А.А., Савельев В.В. Реконструкция гидротермических условий формирования грядово-мочажинного комплекса в голоцене на юге Западной Сибири // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2014. № 3 (27). С. 6–22.

20. Курьина И.В., Головацкая Е.А. Палеокомплексы раковинных амеб (Rhizopoda, Testacea) в торфяной залежи низинного болота (на юге лесной зоны Западной Сибири) // Известия РАН. Сер. Биология. 2018. № 1. С. 103–112. doi: 10.7868/S0002332918010137.
21. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. 2012. URL: <https://www.r-project.org/> (accessed: 01.12.2017).
22. Juggins S. rioja: Analysis of quaternary science data. R package version (0.8-7). 2012. URL: <http://www.staff.ncl.ac.uk/stephen.juggins/> (accessed: 01.12.2017).
23. Oksanen J., Blanchet F.G., Kindt R., Legendre P., Minchin P.R., O'Hara R.B., Simpson G.L., Solymos P., Stevens M.N. vegan: Community ecology package. R package version 2.2-0. 2012. URL: <https://github.com/vegandevs/vegan/> (accessed: 01.12.2017).
24. Цыганов А.Н., Бабешко К.В., Новенко Е.Ю., Малышева Е.А., Пейн Р.Д., Мазей Ю.А. Количественная реконструкция гидрологического режима болот по ископаемым сообществам раковинных амеб // Экология. 2017. № 2. С. 147–155. doi: 10.7868/S0367059717020081.
25. Климанов В.А. Восстановление палеотемператур и палеоосадков на основе спорово-пыльцевых данных // Методы реконструкции палеоклиматов. М. : Наука, 1985. С. 38–48.
26. Blyakharchuk T.A. Western Siberia, a review of Holocene climatic changes // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. 2009. Т. 1. № 2. С. 4–12.
27. Бляхарчук Т.А. Палеореконструкция климатических изменений на территории БВБ с использованием метода В.А. Климанова // Исследование природно-климатических процессов на территории Большого Васюганского болота / отв. ред. М.В. Кабанов. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2012. С. 8–14.
28. Stuiver M., Reimer P.J., Reimer R.W. CALIB 7.1. 2017. URL: <http://calib.org> (accessed: 30.11.2017).
29. Хотинский Н.А. Голоцен Северной Евразии. М. : Наука, 1977. 200 с.
30. 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.

Поступила в редакцию 01.02.2018; повторно 20.04.2018 г.;

Принята 17.05.2018 г.; опубликована 15.06.2018 г.

Авторский коллектив:

Курьина Ирина Владимировна – канд. биол. наук, н.с. лаборатории мониторинга лесных экосистем Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3).

E-mail: irina.kuryina@yandex.ru

Веретенникова Елена Эдуардовна – канд. биол. наук, н.с. лаборатории физики климатических систем Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3).

E-mail: lena2701@yandex.ru

Головацкая Евгения Александровна – д-р биол. наук, директор Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3).

E-mail: golovatskayaea@gmail.com

Бляхарчук Татьяна Артемьевна – д-р биол. наук, в.н.с. лаборатории мониторинга лесных экосистем Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3).

E-mail: tarun5@rambler.ru

Смирнов Сергей Васильевич – канд. физ.-мат. наук, с.н.с. лаборатории физики климатических систем Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3).

E-mail: smirnov@imces.ru

For citation: Kurina IV, Veretennikova EE, Golovatskaya EA, Blyakharchuk TA, Smirnov SV. Dynamics of the surface wetness of mires in the southern taiga subzone of Western Siberia in the middle and late Holocene. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* = *Tomsk State University Journal of Biology*. 2018;42:218-241. doi: 10.17223/19988591/42/12 In Russian, English Summary

**Irina V. Kurina, Elena E. Veretennikova, Evgeniya A. Golovatskaya,
Tatiana A. Blyakharchuk, Sergei V. Smirnov**

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation

Dynamics of the surface wetness of mires in the southern taiga subzone of Western Siberia in the middle and late Holocene

The research is devoted to the comparative analysis of the dynamics of the surface wetness of mires located within the southern taiga subzone of Western Siberia. Synchronous changes in the surface wetness of different mires in the same area during their development in the Holocene are most likely due to the influence of hydroclimatic fluctuations on them. The aim of our work was to identify synchronous changes in the surface wetness in different mires within a single region in the course of their development in the Holocene and to search for the conformity with regional paleoclimatic changes.

The objects were four different mires on the territory of the southern taiga of West Siberia: 1) the Temnoye raised mire, located on the second terrace of the Tom River; 2) the Bakcharsky watershed mire (a peat core was taken from the hollow of the ridge-hollow complex); 3) the Samara mire, which occupies the first floodplain terrace of the Bakchar river; 4) the Petropavlovskoye raised mire, located on the right-bank terrace of the Ob river (Table 1 and Fig. 1). For the first three mires, we calculated a quantitative reconstruction of the water-table depth using transfer function models on the basis of testate amoebae analysis of peat. We developed two models of transfer functions for the area of the southern taiga of Western Siberia, separately, for ombrotrophic and minerotrophic mires using a weighted average (Figs. 2 and 3). In the fourth mire, reconstruction of paleoprecipitation was carried out using Klimanov's information-statistical method. The calibrated age of peat deposits in the number system Before Present was used in the work (Table 2).

The studied mires differ from one another in the degree of surface wetness. The surface wetness of the Temnoye and Petropavlovskoye mires is much less than that of the Samara mire and the hollow from the Bakcharsky mire. The results of the construction of depth-age models of the studied peat cores indicated that peat accumulated with different speeds during the formation of mire sediments, in most cases slowing down of peat accumulation occurred non-simultaneously in different mires (Fig. 4). The time resolution of the reconstructions of the surface wetness in the studied mires varied from 51 to 650 years and, on average, was 193 years in the hollow from the Bakcharsky mire, 104 years in the Temnoye mire, 243 years in the Samara mire, and 188 years in the Petropavlovskoye mire (Fig. 5). As a result of a comparative analysis of the development of the studied mires over the last 8,500 years, we identified six periods of synchronous increase in their surface wetness: 8500-8400, 5700-5600, 5200-4600, 2600-2300, 1300-1100, and 900-700 yr BP, as well as 11 periods of synchronous drying of the mire surface: 6700-6600, 6100-6000, 4600-4400, 4300-4100, 4000-3800, 3500-3400, 3200-3000, 2700-2600, 2100-1900, 1500-1300, and 1100-900 yr BP (Fig. 6). These periods are consistent with the corresponding changes in paleoprecipitations. In general, the dynamics of the surface wetness in the studied mires corresponded to the

climatic characteristics of different periods in the Holocene, revealed in West Siberia. Thus, in the Atlantic period synchronous wet stages in the studied mires were shown; in the Subboreal period mainly synchronous dry stages were singled out, and in the Subatlantic period the wet and dry synchronous stages alternating one by one were revealed in the studied mires. The periods with low time resolution in reconstructions complicate the detection of synchronous changes in the surface wetness of mires. We concluded that the higher the time resolution, the more likely it is that the compared water-table depth values existed in different mires at the same time, therefore, the greater the objectivity of data synchronization from different objects. The problem of low time resolution can be avoided by increasing the number of objects studied, or by a smaller sampling step in the peat cores. The synchronous changes in the surface wetness of mires and paleoprecipitations, which we have identified, reflect the fluctuations in the climate humidity in the Holocene. Our results indicate the sensitivity of the studied ombrotrophic and minerotrophic mires to hydroclimatic fluctuations during their development. In the future, it is planned to continue the research and include a comparative analysis of quantitative data of paleoecological reconstructions from other mires on the territory of the southern taiga subzone of West Siberia, as well as to increase the time resolution of the reconstructions. This will make it possible to clarify and detail information on century to millennial-scale climate variations on the studied territory in the Holocene.

The paper contains 6 Figures, 2 Tables and 30 References.

Key words: rhizopod analysis; testate amoebae; pollen data; reconstruction; paleoclimate; paleoecology.

Funding: The research was financially supported by the RFBR grant No 18-45-703003/p_мол_a

References

1. Kremenetski KV, Velichko AA, Borisova OK, MacDonald GM, Smith LC, Frey KE, Orlova LA. Peatlands of the Western Siberian lowlands: current knowledge on zonation, carbon content and Late Quaternary history. *Quaternary Science Reviews*. 2003;22:703-723. doi: [10.1016/S0277-3791\(02\)00196-8](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(02)00196-8)
2. *Bolotnye sistemy Zapadnoy Sibiri i ikh prirodookhrannoe znachenie* [Mire systems of Western Siberia and their conservation value]. Kuvaev VB, editor. Tula: Grif i K Publ.; 2001. 584 p. In Russian
3. Lapshina ED. Flora bolot yugo-vostoka Zapadnoy Sibiri [Flora of mires in the southeast of West Siberia]. Tomsk: Tomsk State University Publ.; 2003. 294 p. In Russian
4. Borisova OK, Novenko EYu, Zelikson EM, Kremenetski KV. Lateglacial and Holocene vegetational and climatic changes in the southern taiga zone of West Siberia according to pollen records from Zhukovskoye peat mire. *Quaternary International*. 2011;237:65-73. doi: [10.1016/j.quaint.2011.01.015](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.01.015)
5. Blyakharchuk TA. Novye palinologicheskie dannye o dinamike rastitel'nogo pokrova i klimata Zapadnoy Sibiri i prilegayushchikh territoriy v golotsene [New palynological data on the dynamics of vegetation cover and the climate of Western Siberia and adjacent territories in the Holocene]. Novosibirsk: Geo Publ.; 2012. 139 p. In Russian
6. Warner BG, Charman DJ. Holocene changes on a peatland in Northwestern Ontario interpreted from testate amoebae (*Protozoa*) analysis. *Boreas*. 1994;23:270-279. doi: [10.1111/j.1502-3885.1994.tb00949.x](https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1994.tb00949.x)
7. Turner TE, Swindles GT, Roucoux KH. Late Holocene ecohydrological and carbon dynamics of a UK raised bog: impact of human activity and climate change. *Quaternary Science Reviews*. 2014;84:65-85. doi: [10.1016/j.quascirev.2013.10.030](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.10.030)
8. Lamentowicz M, Slowinski M, Marcisz K, Zielinska M, Kaliszan K, Lapshina E, Gilbert D, Buttler A, Fialkiewicz-Koziel B, Jassey VEJ, Laggoun-Defarge F, Kolaczek P. Hydrological

- dynamics and fire history of the last 1300 years in western Siberia reconstructed from a high-resolution, ombrotrophic peat archive. *Quaternary Research*. 2015;84(3):312-325. doi: [10.1016/j.yqres.2015.09.002](https://doi.org/10.1016/j.yqres.2015.09.002)
9. Willis KS, Beilman D, Booth RK, Amesbury M, Holmquist J, MacDonald G. Peatland paleohydrology in the southern West Siberian Lowlands: Comparison of multiple testate amoebae transfer functions, sites, and *Sphagnum* $\delta^{13}\text{C}$ values. *The Holocene*. 2015;25(9):1425-1436. doi: [10.1177/0959683615585833](https://doi.org/10.1177/0959683615585833)
 10. Aaby B. Cyclic climatic variations in climate over the past 5,500 years reflected in raised bogs. *Nature*. 1976;263:281-284. doi: [10.1038/263281a0](https://doi.org/10.1038/263281a0)
 11. Charman DJ. Biostratigraphic and palaeoenvironmental applications of testate amoebae. *Quaternary Science Reviews*. 2001;20:1753-1764. doi: [10.1191/0959683604hl696rp](https://doi.org/10.1191/0959683604hl696rp)
 12. Mauquoy D, Engelkes T, Groot MHM, Markesteijn F, Oudejans MG, van der Plicht J, van Geel B. High-resolution records of late-Holocene climate change and carbon accumulation in two north-west European ombrotrophic peat bogs. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2002;186:275-310. doi: [10.1016/s0031-0182\(02\)00513-8](https://doi.org/10.1016/s0031-0182(02)00513-8)
 13. Booth RK. Testing the climate sensitivity of peat-based paleoclimate reconstructions in mid-continental North America. *Quaternary Science Reviews*. 2010;29:720-731. doi: [10.1016/j.quascirev.2009.11.018](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2009.11.018)
 14. Lavoie M, Pellerin S, Larocque M. Examining the role of allogeneous and autogenous factors in the long-term dynamics of a temperate headwater peatland (southern Quebec, Canada). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2013;386:336-348. doi: [10.1016/j.palaeo.2013.06.003](https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2013.06.003)
 15. Loisel J, Garneau M. Late Holocene paleoecohydrology and carbon accumulation estimates from two boreal peat bogs in eastern Canada: Potential and limits of multi-proxy archives. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2010;291:493-533. doi: [10.1016/j.palaeo.2010.03.020](https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.03.020)
 16. Bolota Zapadnoy Sibiri, ikh stroenie i gidrologicheskiy rezhim [Peatlands of West Siberia, their structure and hydrological regime]. Ivanov KE and Novikov SM, editors. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ.; 1976. 448 p. In Russian
 17. Uskova LM. Analiz svyazi zabolochennosti rechnykh basseynov s fiziko-geograficheskimi usloviyami taezhnoy zony Zapadnoy Sibiri [Analysis of the connection between swampiness of river basins and physical and geographical conditions of the taiga zone in Western Siberia]. *Geography and Natural Resources*. 1982;2:72-79. In Russian
 18. Preis YuI, Kurina IV. Paleorekonstruktsiya vysokogo razresheniya po dannym kompleksnogo issledovaniya torfyanykh otlozheniy yuzhnoy taygi Zapadnoy Sibiri [High-resolution paleoreconstruction according to the data of a complex study of peat deposits in the southern taiga of Western Siberia]. In: *Issledovanie prirodno-klimaticheskikh protsessov na territorii Bol'shogo Vasyuganskogo bolota* [Study of natural and climatic processes on the territory of the Great Vasyugan Mire]. Kabanov MV, editor. Novosibirsk: SB RAS Publ.; 2012. pp. 14-38. In Russian
 19. 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. *Tomsk State University Journal of Biology*. 2014;3(27):6-22. In Russian, English Summary
 20. Kurina IV, Golovatskaya EA. Testate Amoebae Assemblages (Rhizopoda and Testacea) in the Peat Deposits of the Floodplain Terrace Swamp (the South of Forested Zone of Western Siberia). *Biology Bulletin*. 2018;45(1):91-99. doi: [10.1134/S1062359018010077](https://doi.org/10.1134/S1062359018010077)
 21. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. 2012. [Electronic resource]. Available at: <https://www.r-project.org/> (accessed: 01.12.2017).
 22. Juggins S. rioja: Analysis of quaternary science data. R package version (0.8-7). 2012. Available at: <http://www.staff.ncl.ac.uk/stephen.juggins/> (accessed: 01.12.2017).

23. Oksanen J, Blanchet FG, Kindt R, Legendre P, Minchin PR, O'Hara RB, Simpson GL, Solymos P, Stevens MN. *vegan*: Community ecology package. R package version 2.2-0. 2012. Available at: <https://github.com/vegandevs/vegan/> (accessed: 01.12.2017).
24. Tsyganov AN, Babeshko KV, Novenko EYu, Malysheva EA, Payne RJ, Mazei YuA. Quantitative Reconstruction of Peatland Hydrological Regime with Fossil Testate Amoebae Communities. *Russian Journal of Ecology*. 2017;48(2):135-142. doi: [10.1134/S1067413617020084](https://doi.org/10.1134/S1067413617020084)
25. Klimanov VA. Vosstanovlenie paleotemperatur i paleosadkov na osnove sporovopyl'tsevykh dannyykh [Reconstruction of paleotemperature and paleoprecipitation based on spore-pollen data]. In: *Metody rekonstruktsii paleoklimatov* [Methods of paleoclimate reconstruction]. Moscow: Nauka Publ.; 1985. pp. 38-48. In Russian
26. Blyakharchuk TA. Western Siberia, a review of Holocene climatic changes. *Journal of Siberian Federal University. Biology*. 2009;1(2):4-12. In Russian
27. Blyakharchuk TA. Paleorekonstruktsiya klimaticheskikh izmeneniy na territorii BVB s ispol'zovaniem metoda VA Klimanova [Paleoreconstruction of climatic changes on the territory of the GVM (Great Vasyugan Mire) using Klimanov's method]. In: *Issledovanie prirodno-klimaticheskikh protsessov na territorii Bol'shogo Vasyuganskogo bolota* [Study of natural and climatic processes on the territory of the Great Vasyugan Mire]. Kabanov MV, editor. Novosibirsk: SB RAS Publ.; 2012. pp. 8-14. In Russian
28. Stuiver M, Reimer PJ, Reimer RW. CALIB 7.1. 2017. Available at: <http://calib.org> (accessed: 30.11.2017).
29. Khotinskiy NA. Golotsen Severnoy Evrazii [The Holocene of Northern Eurasia]. Moscow: Nauka Publ.; 1977. 197 p. In Russian
30. 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

Received 01 February 2018; Revised 20 April 2018;

Accepted 17 May 2018; Published 15 June 2018

Author info:

Kurina Irina V, Cand. Sci. (Biol.), Researcher, Laboratory of Monitoring of Forest Ecosystems, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10/3 Academicheskoy Ave., Tomsk 634055, Russian Federation.

E-mail: irina.kuryina@yandex.ru

Veretennikova Elena E, Cand. Sci. (Biol.), Researcher, Laboratory of Physics of Climatic Systems, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10/3 Academicheskoy Ave., Tomsk 634055, Russian Federation.

E-mail: lana2701@yandex.ru

Golovatskaya Evgeniya A, Dr. Sci. (Biol.), Director of the Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10/3 Academicheskoy Ave., Tomsk 634055, Russian Federation.

E-mail: golovatskayaeva@gmail.com

Blyakharchuk Tatiana A, Dr. Sci. (Biol.), Leading Researcher, Laboratory of Monitoring of Forest Ecosystems, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10/3 Academicheskoy Ave., Tomsk 634055, Russian Federation.

E-mail: tarun5@rambler.ru

Smirnov Sergei V, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Laboratory of Physics of Climatic Systems, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10/3 Academicheskoy Ave., Tomsk 634055, Russian Federation.

E-mail: smirnov@imces.ru