

**НАКОПЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ВЕРХОВЫХ
ТОРФЯНИКАХ ПОДТАЕЖНОГО ЗАУРАЛЬЯ В ГОЛОЦЕНЕ***

© 2014 г. Н. С. Ларина, С. И. Ларин, Г. А. Меркушина

Тюменский государственный университет, 625003, Тюмень, ул. Семакова, 10

e-mail: nslarina@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.07.2013 г.

Приводятся результаты изучения изменчивости геохимических показателей слоев верхового торфяника Сартамский рям на юге Тюменской обл., опирающихся на временную радиоуглеродную шкалу. Выделены четыре основных стадии формирования торфяной залежи в голоцене: органо-минеральный слой донных отложений палеозера (до 5065 ± 60 лет назад); низинный (4300–4900 л. н.), переходный (3100–4300 л. н.); верховой торф (250–3100 л. н.). Верхний слой торфа (последние 200–300 лет) имеет существенные отличия от его основной части, в частности, характеризуется увеличением зольности и накоплением ряда элементов. Методом главных компонент проанализирована связь между различными характеристиками залежи и дана оценка условиям ее формирования в различные периоды времени, включая климатические условия (в относительных единицах). Выделен антропогенный сигнал накопления некоторых элементов в болотных системах.

Ключевые слова: верховые торфяники, химический анализ, тяжелые металлы, послойное распределение элементов, радиоуглеродное датирование, голоцен.

DOI: 10.7868/S0032180X14050128

ВВЕДЕНИЕ

Верховые торфяники в геохимическом отношении являются достаточно однородным объектом, а исключительно высокая сорбционная способность торфа позволяет им удерживать вещества, выпадающие из атмосферы. Это дает возможность использовать торфяные залежи как объект информации об изменениях климата и косвенно судить о состоянии атмосферы в период накопления слоев торфа [11, 14, 17–20]. Современный период антропогенной деятельности характеризуется рассеиванием большого спектра металлов, что приводит к увеличению содержания их в природной среде, и, соответственно, — в верхних слоях торфяной залежи [1–3, 7–9, 15, 16, 20].

Исследованиями верховых торфяников, проведенными в центральной части Русской равнины [14], установлено, что поверхностные слои торфа обогащены тяжелыми металлами (свинцом, цинком, медью, кадмием и т.д.). Их содержание в десятки и даже сотни раз выше, чем в слоях торфа, залегающих глубже 1.2–1.5 м. Радиоуглеродное датирование образцов торфа показало, что постепенное нарастание концентрации тяже-

лых металлов в торфе началось не менее 1000 лет назад. Авторы связывают это с освоением естественных ландшафтов Русской равнины человеком — выжиганием лесов, распашкой почв и другими факторами. На севере Западной Сибири такого обогащения верхних слоев не обнаружено и концентрация тяжелых металлов в поверхностных горизонтах торфа почти такая же, как и в глубоких слоях торфа на Русской равнине [12]. Поэтому геохимическое исследование верхового торфяника в подтаежной зоне Западной Сибири является весьма интересным, так как позволяет оценить эколого-палеогеохимическую ситуацию в исследуемом регионе и сравнить ее с данными по Русской равнине и северу Западной Сибири.

В составе природных комплексов Западной Сибири, в том числе в пределах подтаежной зоны, болота занимают особое место — на их долю приходится значительная часть ее территории [11]. В верховых торфяниках главным источником минеральных веществ является атмосферная пыль, привносимая с осадками и непосредственно эоловым путем. Верховые торфяники формируются в долинах древних рек, в депрессиях, среди боровых песков и подстилаются песчаными породами, часто — при зарастании озер или в высохших озерных котловинах на водоупорных отложениях, благодаря образованию застойных поверх-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки (Соглашение № 14.В37.21.1900); грантов РФФИ № 11-05-01173-а; № 14-05-00956-а.

ностных вод. Это способствует появлению моховых фитоценозов преимущественно сфагнового состава, что в конечном итоге приводит к образованию торфяников, получивших наименование “рямов”. Этот вид торфяных залежей является достаточно представительным объектом для реконструкции палеоклиматических условий Западной Сибири в голоцене [3, 7, 11, 12, 14].

Целью данной работы было изучение особенностей динамики накопления и миграции некоторых элементов в торфяной залежи подтаежной зоны Зауралья.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Изученный разрез (рис. 1), расположен в центральной части Сартамского яма, имеет мощность 267 см (вскрыт на глубину 276 см). Общая стратиграфия торфяника (сверху вниз) выглядит следующим образом:

0–267 см – горизонт торфа буровато-коричневого цвета. На глубине 10–15 см заметно выраженный по стенке разреза прослой углей (размеры угольков 1–3 мм). На глубине 76 см – остатки березовой коры (бересты). На глубине 84 см – угольки, ракушки. На глубине 103–104 см остатки истлевшей березовой коры (бересты). На глубине 160–164 см совершенно не разложившийся прослой, который фиксирует границу буроватого торфа. На глубине 166–176 см – пень. С глубины примерно 166 см и выше, слой торфа, менее разложившийся, заметны остатки травянистой растительности (осоки). Граница не ясная. На глубине 211 см найдены неразложившиеся остатки осоки, встречается береста и кора;

267–271 см – прослой глины черного цвета. Границы заметные, слегка размывые;

271–276 см – основание разреза. Горизонт пластичной сизоватого цвета глины, с редкими остатками растительности. Нижняя граница этого горизонта не пройдена, верхняя граница ясная.

Образцы для геохимического анализа отобраны по стенке соседнего шурфа, имеющего стратиграфию аналогичную описанной выше.

Для определения абсолютного возраста слоев торфа было получено 15 радиоуглеродных дат. Определение остаточной активности углерода выполнено в лаборатории геологии и палеоклиматологии кайнозоя Института геологии СО РАН на двухканальной установке по бензольно-сцинтилляционному варианту. Для расчета возраста использован период полураспада ^{14}C , равный 5570 лет, сам возраст рассчитан относительно 1950 г.

Для более полного представления об условиях, в которых происходило формирование данного торфяника, был проведен геохимический анализ образцов, отобранных с шагом 3 см (82 образца).



Рис. 1. Место расположения Сартамского яма (показано значком), Тюменская обл.

В лабораторных условиях образцы доводились до воздушно-сухого состояния, измельчались и просеивались через сито ($d = 2$ мм). В водной вытяжке из образцов (1 г торфа в 25 мл деионизированной воды) были определены основные геохимические показатели (рН, окислительно-восстановительный потенциал, электропроводность). рН и Eh определяли потенциометрическим, χ – кондуктометрическим методами. Определение зольности (ЗТ), гигроскопической влажности и потерь при прокаливании (ППП) проводили гравиметрическим методом. Для определения остальных показателей, озоленную при температуре 550°C навеску торфа, растворяли в 10%-ной азотной кислоте. В полученной вытяжке Р (в пересчете на P_2O_5), Mn и Fe определяли фотометрическим методом, остальные металлы (K, Cu, Pb, Cd, Sr, Ni, Zn) – методом атомно-абсорбционной спектроскопии в пламени.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Радиоуглеродные датировки. По данным определения абсолютного возраста придонных слоев торфа формирование торфяника началось 5065 ± 60 л. н. Зависимость радиоуглеродного возраста от глубины залегания образца (рис. 2, А) близка к линейной ($y = 18.542x - 467.73$; $R^2 = 0.91$), однако наиболее точно описывается степенной зависимостью ($y = 460.57e^{0.0093x}$; $R^2 = 0.99$). При этом скорость накопления торфа в разные периоды формирования торфяной залежи существенно различается (рис. 2, Б). Наиболее серьезные изменения происходили последние 1500 лет, и в нижней части разреза – около 5000 л. н. Обращает внимание наличие двух максимумов на кривой: 1100 и 650 л. н.

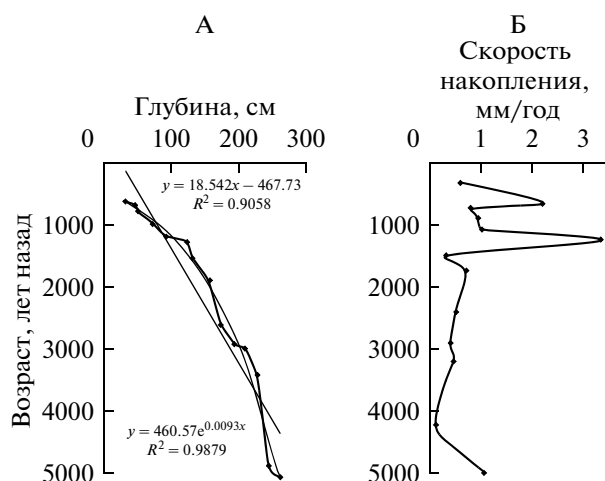


Рис. 2. Зависимость радиоуглеродных датировок от глубины отбора образцов (А) и скорости накопления торфа от радиоуглеродного возраста образцов (Б) для Сартамского яма.

Зольность. Распределение зольности по разрезу представлено на рис. 3. Интервал глубин 237–246 см (5000–5200 л. н.) соответствует органико-минеральному слою, характеризующемуся высокой величиной зольности ($58.8 \pm 10.0\%$). Ве-

роятно, эта часть разреза представляет собой донные отложения палеозера, на основе которого образовался торфяник, либо палеопочвы, которые в дальнейшем были затоплены. Затем в течение непродолжительного периода времени произошло резкое уменьшение зольности (примерно в 20 раз), после чего до 3100 л. н. величина зольности менялась в значительном интервале (от 2 до 9%), составляя в среднем $5.7 \pm 1.2\%$. Начиная с 3100 л. н., содержание минерального компонента уменьшается и незначительно изменяется с глубиной. Среднее значение на этом участке составляет $2.7 \pm 0.3\%$. Последние 200 лет происходит существенное возрастание зольности к поверхности ($7.9 \pm 1.8\%$).

pH и Eh. При наличии многочисленных колебаний значений pH по глубине разреза в пределах 1–2 единиц (рис. 3), очевиден общий тренд значений pH в кислую область (pH уменьшается снизу вверх на 1.5 ед. pH). Однако в верхней части торфяника (последние 200 лет) происходит увеличение значения pH (от 4.4 до 5.4). В основании торфяника pH изменяется незначительно (6.0 ± 0.2) и имеет максимальное значение по разрезу. Распределение величины Eh (рис. 3) характеризуется периодическим изменением окислительно-восстановительных условий. В период,

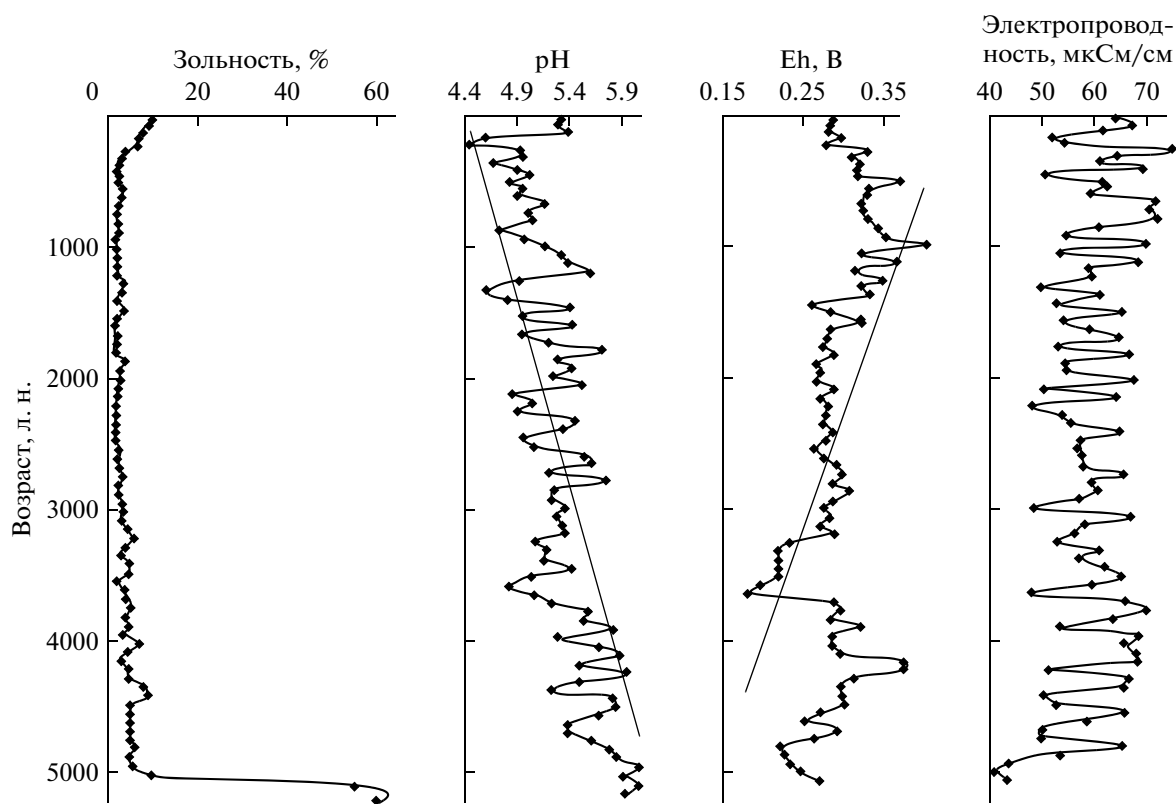


Рис. 3. Распределение зольности, pH, Eh и электропроводности по глубине торфяника Сартамский ям.

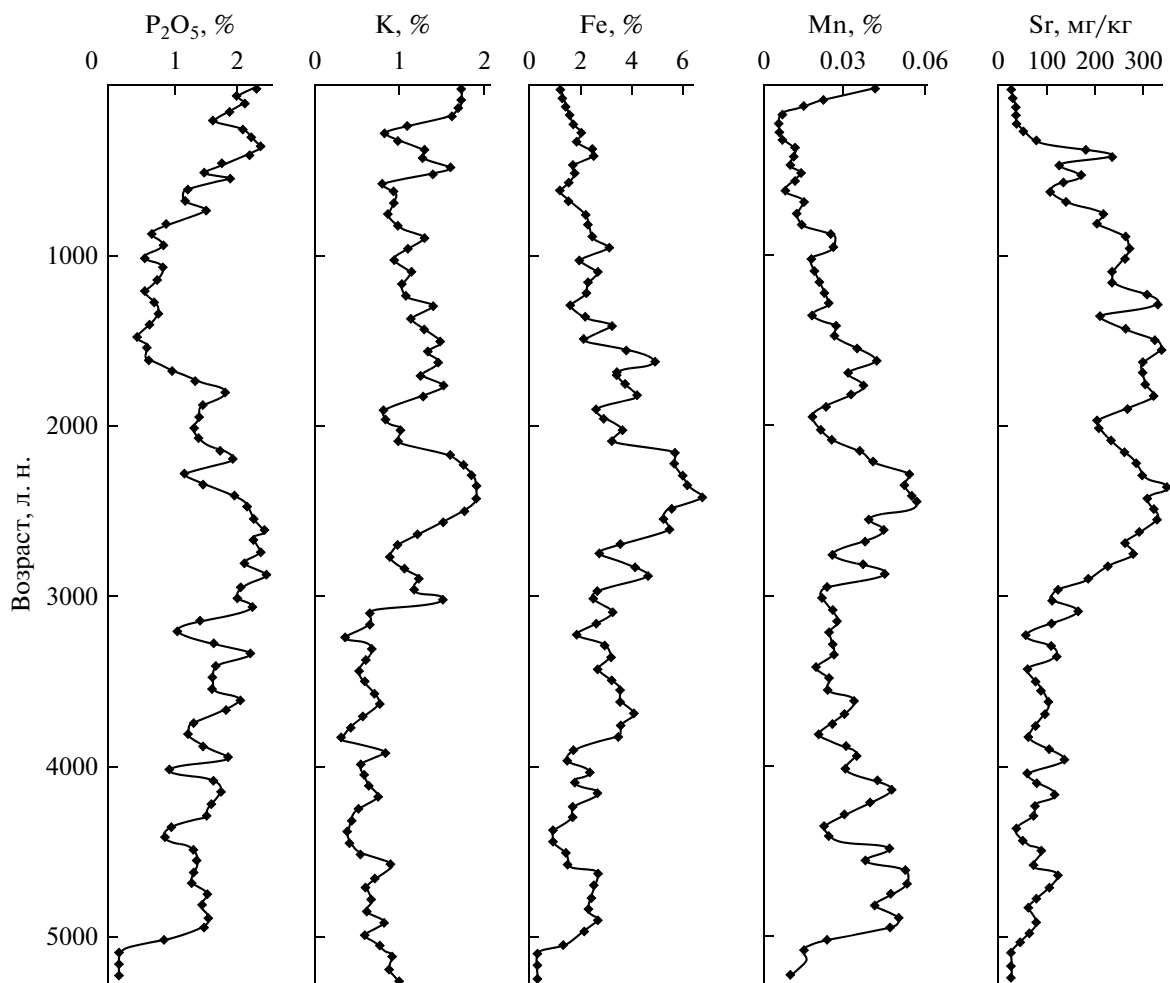


Рис. 4. Распределение содержания P, K, Fe, Mn и Sr в золе в зависимости от возраста образцов Саргамского яра.

предшествующий формированию торфяника, величина потенциала смещается в более восстановительную область, что соответствует периоду зарастания озера. Эвтрофирование палеозера, по всей видимости, привело к резкому увеличению количества органического вещества в донных отложениях, для разложения которого требовалось большое количество кислорода, что и привело к смещению Eh в восстановительную область. Начиная с 5000 л. н., Eh неравномерно смещается в окислительную область до 4300 л. н. В период с 4300 по 3750 л. н. происходит неравномерное смещение потенциала в восстановительную область. С 3750 по 3350 л. н. Eh смещается в окислительную область, после чего наблюдается значительный период окислительно-восстановительной стабильности – до 1700 л. н. В верхней части торфяника (с 1000 л. н.), происходит неравномерное уменьшение потенциала. Среднее значение Eh по разрезу составляет 0.29 ± 0.05 В, минимальное – 0.2 В (3750 л. н.), а максимальное – 0.4 В

(1000 л. н.). На кривой явно выделяются два максимума (1000 и 4300 л. н.).

Электропроводность. На рис. 3 приведена зависимость электропроводности водных почвенных растворов от глубины залегания образцов торфа, характеризующая суммарное количество ионов. Электропроводность изменяется с глубиной в интервале значений от 40 до 70 мкСм/см, при среднем значении 59 ± 2 мкСм/см. Минимальное значение электропроводности наблюдается в нижней минеральной части разреза – 42 мкСм/см и до 5000 л. н. происходит ее резкое возрастание. После этого величина электропроводности периодически изменяется в пределах 20 мкСм/см.

Фосфор. Распределение содержания P₂O₅ по разрезу имеет неравномерный характер (рис. 4). В нижней части разреза концентрация фосфора в торфе имеет минимальные значения (0.1%). С 5100 л. н. за короткий промежуток времени (около 200 лет) происходит резкое увеличение его содержания. После этого наблюдается длительный период, характеризующийся периодически-

ми колебаниями в содержании фосфора. С 1800 л. н. происходит значительное уменьшение его содержания в золе торфа до минимального в торфяной толще. В период 800–1500 л. н. концентрация фосфора низка и мало изменяется с глубиной. Последние 800 лет наблюдаются колебания в содержании P_2O_5 с общим трендом его увеличения к поверхности.

Калий. Послойное распределение металла представлено на рис. 4. Анализ характера зависимости позволяет выделить 2 интервала: 1 – с момента формирования торфяной залежи до 3100 л. н. – содержание калия изменяется незначительно, среднее значение содержания на этом участке составляет 0.6 ± 0.1 ; 2 – от 3000 л. н. до современного периода – среднее содержание К в торфе увеличилось в 2 раза ($1.2 \pm 0.1\%$) и претерпело значительные колебания. Последние 300 лет происходит увеличение его содержания в золе торфа.

Железо. Максимальное количество Fe (6.7%) обнаружено около 2400 л. н., а минимальное (0.1%) – в нижнем органо-минеральном слое. Распределение содержания металла по глубине позволяет выделить несколько характерных периодов: нижняя часть разреза (до 5100 л. н.) – очень низкое, мало изменяющееся содержание; 5100–4900 л. н. – резкое увеличение до 2.5%, заканчивающийся падением до 0.8% к 4400 л. н.; неустойчивый рост до 3700 л. н. Относительно стабильно содержание Fe в золе до 3000 л. н., после которого происходит неравномерное возрастание содержания металла до максимального по разрезу (2400 л. н.). После этого наблюдается стабильный тренд к уменьшению концентрации – до 1% (у поверхности).

Марганец. Распределение Mn по разрезу имеет определенное сходство с распределением Fe: максимальное и минимальное количество элементов наблюдается в один и тот же период (рис. 4). Существенные различия в распределении происходят только в верхней части разреза (последние 200–300 лет), где содержание Mn резко возрастает, приближаясь к максимальным значениям по разрезу, а содержание Fe устойчиво уменьшается, приближаясь к минимальным значениям по разрезу.

Стронций. Послойное изменение содержания Sr (рис. 4) происходит в широком интервале: от 20 мг/кг (нижняя и верхняя части разреза) до 340 мг/кг (в средней части разреза). В период 3000–5000 л. н. его концентрация в золе торфа изменяется незначительно, в среднем составляя 73 ± 10 мг/кг. Затем содержание Sr резко возрастает до максимального значения по разрезу (1200 л. н.) и остается достаточно высоким продолжительный период времени (до 400 л. н.). Среднее содержание Sr в этот период составляет 219 ± 23 мг/кг. В следующие 100 лет происходит резкое умень-

шение содержания до минимального по разрезу и практически не изменяется последние 200–300 лет (31 ± 5 мг/кг).

Тяжелые металлы распределяются в торфяной толще неодинаково, как в количественном, так и в качественном отношении (рис. 5). По содержанию металлов в золе торфа можно составить следующий ряд: $Cu > Zn > Pb > Ni > Cd$. В органо-минеральном слое содержание Cu, Zn и Cd практически не изменяется, в то время как концентрация Pb и Ni резко возрастает до 4900 л. н. (в 6 и 3 раза, соответственно). Около 5000 л. н. происходит существенное увеличение содержания Cu (в 3 раза), которое затем неравномерно уменьшается до 4400 л. н., приближаясь к исходным значениям. Следующие 200–300 лет содержание Cu снова высокое, после чего происходит постепенное уменьшение ее концентрации до значений, близких в основании торфяной толщи. Период относительной стабильности в содержании Cu сменяется периодом значительных колебаний в ее содержании с общим трендом к возрастанию с 3300 до 1700 л. н. Затем в течение 200 лет происходит резкое уменьшение содержания Cu (более, чем в 4 раза), которое сменяется более стабильным периодом с общей тенденцией к уменьшению ее содержания в золе торфа.

В распределении Zn по разрезу можно выделить период стабильного содержания металла до 1500 л. н. (с наличием максимума около 2500 л. н.), который сменился ростом его содержания (более чем в 4 раза) в следующие 500 лет. Последнюю тысячу лет наблюдается тренд к уменьшению содержания этого элемента. Характеризуя содержание Pb по исследуемому разрезу, можно отметить высокую степень неравномерности его изменения с глубиной и явно выраженной тенденцией к возрастанию его содержания последние 500 лет до максимальных значений по разрезу. Содержание Ni по разрезу изменяется значительно, но более существенными эти изменения были до 3000 л. н. В этот период можно выделить три максимума в содержании этих элементов – 4800, 4200 и 3600 л. н. В дальнейшем наблюдается затухание этих колебаний с общей тенденцией к уменьшению содержания металла в золе. Иначе распределяется в толще Cd. В нижней части разреза (до 2500 л. н.) происходит сначала медленное, а затем более существенное возрастание содержания этого элемента в золе торфа. При этом наблюдаются 5 ярко выраженных максимумов – 4450, 4100, 3350, 3150, 2500 л. н. После этого содержание Cd в золе падает и остается практически постоянным до 1150 л. н. Последнее тысячелетие характеризуется нестабильностью в его содержании. Оно дважды повышается до максимальных значений по разрезу (900 и 500 л. н.) и падает до значений, близких к минимальным по разрезу (650 и 200 л. н.). Последние 200–300 лет

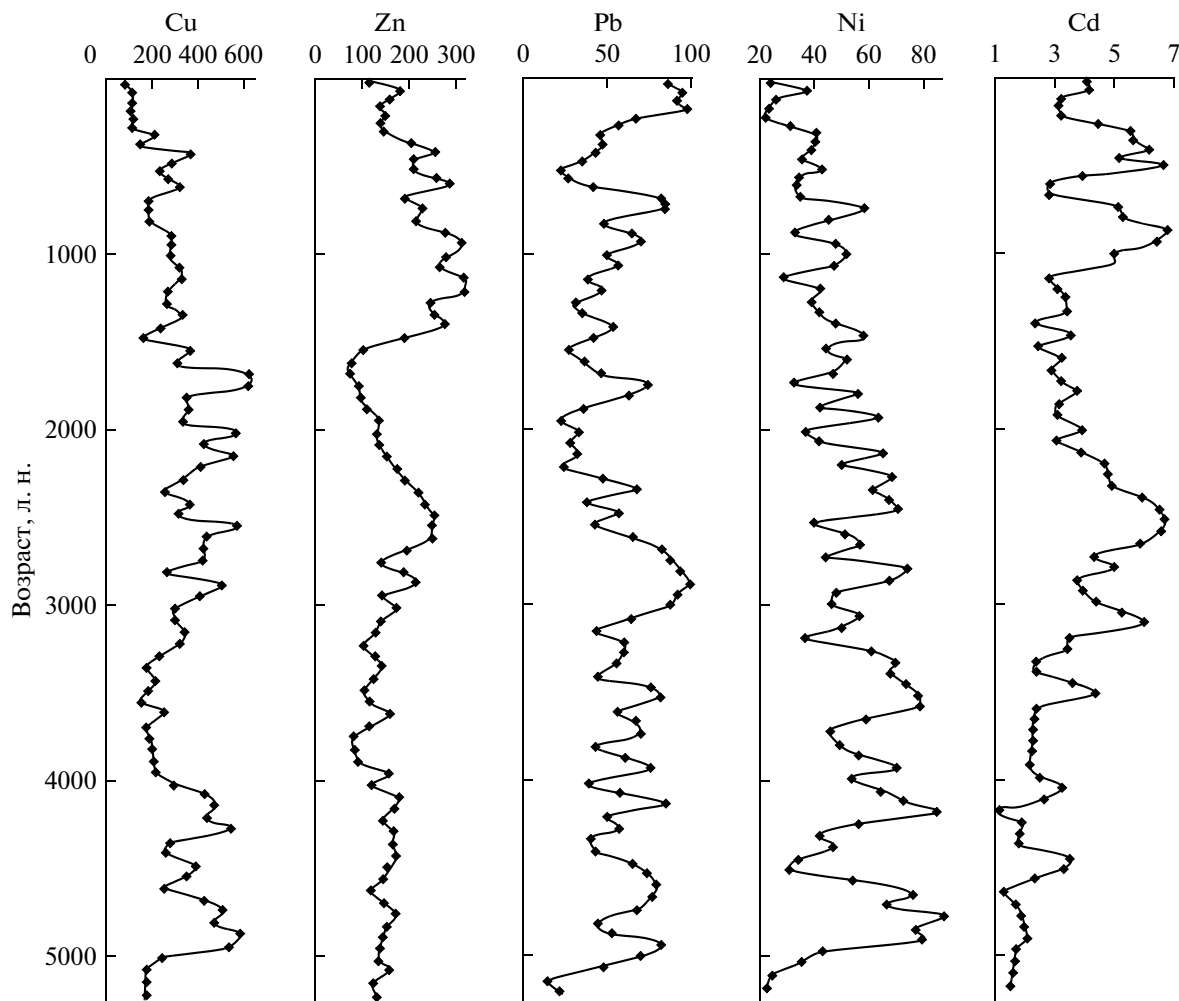


Рис. 5. Распределение содержания тяжелых металлов (мг/кг) в золе торфа по глубине разреза верхового торфяника Сартамский рям.

намечился тренд к увеличению концентрации кадмия в золе.

ОБСУЖДЕНИЕ

Послойное распределение общих геохимических показателей, а также содержания макро- и микроэлементов в торфяной залежи Сартамский рям позволяют не только определить средние значения показателей и интервалы их изменения (табл. 1), но и выделить характерные периоды их формирования и геохимические особенности.

В частности, распределение зольности в исследуемом разрезе позволяет однозначно выделить и охарактеризовать этапы формирования болота. До 5100 л. н. на месте современного болота вероятнее всего существовало палеозеро, образцы донных отложений которого представляют собой пластичную глину сизоватого цвета с редкими остатками растительности. С геохимической точки зрения это органо-минеральный слой, ха-

рактеризующийся относительно высокой зольностью ($58.8 \pm 10.1\%$), низкой концентрацией растворимых в воде веществ (электропроводность 42 ± 3 мкСм/см), высоким значением рН (6.0 ± 0.2). Различия по остальным показателям также значительны. В частности, содержание Р, Fe и Sr более чем на порядок ниже, чем в среднем по разрезу, хотя содержание К в этом слое значительно.

Ниже среднего значения содержание Mn (в 2.3 раза), Cu (в 2 раза), Pb (в 2 раза), Ni (в 2 раза), Cd (в 2.4 раза).

В настоящее время для рассматриваемой территории и сопредельных районов имеется ряд противоречивых реконструкций палеогеографических условий в голоцене [4–6, 10, 13]. В соответствии с климатическими кривыми [4], построенными для данного региона по палинологическим данным (рис. 6), до 5000 л. н. наблюдалось уменьшение влажности и некоторое возрастание температуры. На рубеже около 5000 л. н. клима-

Таблица 1. Средние значения и доверительный интервал геохимических показателей в верховом торфянике Сартамский рям ($P = 0.95$). Над чертой – среднее значение показателя; под чертой – диапазон изменения

Показатель	Возраст, лет назад						
	0–250	350–1500	1500–3100	3100–4300	4300–4900	5000–5200	0–5200
Количество образцов, <i>n</i>	5	19	24	18	10	3	82
Глубина	0–15	20–77	77–152	152–203	204–233	239–246	0–246
Зольность, %	7.9 ± 1.8	2.3 ± 0.3	2.0 ± 0.3	3.9 ± 0.6	5.3 ± 1.0	58.8 ± 10.1	5.5 ± 2.4
	6.5–9.9	1.5–3.5	1.1–3.6	1.6–6.7	4.3–8.2	54.4–62.5	1.1–62.5
рН	5.00 ± 0.55	5.01 ± 0.13	5.26 ± 0.11	5.37 ± 0.16	5.59 ± 0.12	5.95 ± 0.19	5.28 ± 0.08
	4.44–5.38	4.60–5.60	4.85–5.75	4.80–5.94	5.20–5.83	5.90–6.04	4.44–6.06
Eh, В	0.28 ± 0.01	0.33 ± 0.01	0.28 ± 0.01	0.26 ± 0.02	0.29 ± 0.03	0.25 ± 0.05	0.29 ± 0.05
	0.28–0.30	0.26–0.40	0.26–0.32	0.18–0.37	0.22–0.37	0.23–0.27	0.18–0.40
χ , мСм/см	60 ± 8	61 ± 4	58 ± 2	61 ± 3	57 ± 5	42 ± 3	59 ± 2
	52–67	50–72	48–67	47–69	49–66	41–43	41–69
Р, %	1.97 ± 0.33	1.12 ± 0.28	1.71 ± 0.22	1.55 ± 0.16	1.28 ± 0.17	0.12 ± 0.02	1.44 ± 0.13
	1.60–2.29	0.42–2.36	0.60–2.42	0.88–2.18	0.82–1.52	0.11–0.13	0.11–2.42
К, %	1.56 ± 0.35	1.15 ± 0.11	1.29 ± 0.16	0.55 ± 0.07	0.58 ± 0.12	0.90 ± 0.13	0.99 ± 0.09
	1.07–1.73	0.79–1.62	0.63–1.91	0.25–0.83	0.31–0.87	0.85–0.95	0.25–1.91
Fe, %	1.31 ± 0.26	2.04 ± 0.27	4.16 ± 0.55	2.51 ± 0.41	1.77 ± 0.49	0.13 ± 0.06	2.60 ± 0.31
	1.07–1.58	1.04–3.20	0.63–6.73	1.33–3.98	0.73–2.52	0.10–0.13	0.10–6.73
Mn, мг/кг	1.71 ± 183	167 ± 31	347 ± 48	283 ± 38	407 ± 74	119 ± 72	271 ± 29
	42–406	75–262	169–566	180–467	210–520	87–143	42–520
Sr, мг/кг	31 ± 5	217 ± 31	254 ± 27	82 ± 12	68 ± 17	21 ± 3	271 ± 29
	25–34	102–324	107–339	49–129	32–115	87–143	25–339
Cu, мг/кг	102 ± 18	256 ± 34	408 ± 48	276 ± 60	396 ± 88	168 ± 8	307 ± 30
	80–115	123–379	256–629	145–540	233–585	164–170	80–629
Zn, мг/кг	147 ± 33	249 ± 21	158 ± 23	124 ± 15	145 ± 12	132 ± 46	168 ± 14
	114–186	184–317	73–251	77–170	114–169	116–152	73–317
Pb, мг/кг	87 ± 15	47 ± 8	54 ± 11	58 ± 7	60 ± 12	26 ± 44	55 ± 5
	66–96	21–84	19–97	36–84	38–80	12–46	12–97
Ni, мг/кг	27 ± 9	42 ± 4	53 ± 5	62 ± 6	59 ± 15	27 ± 17	50 ± 4
	22–39	27–59	31–73	34–85	30–87	22–35	22–87
Cd, мг/кг	3.5 ± 0.7	4.5 ± 0.7	4.3 ± 0.5	2.7 ± 0.6	2.1 ± 0.5	1.5 ± 0.2	3.6 ± 0.3
	3.1–4.2	2.3–6.9	2.4–6.7	1.1–6.0	1.2–3.5	1.4–1.6	1.1–6.9

тические условия изменились – произошло значительное похолодание и увеличение количества осадков. По геохимическим данным в период 4900–5100 л. н. произошло резкое изменение состава отложений: величина зольности уменьшилась более чем на порядок (с 62 до 4%), то есть резко возросло содержание органического вещества и количество растворенных веществ, величина рН существенно не изменилась, значение Eh продолжало уменьшаться.

Вероятно, изменение климатических условий привело к снижению уровня вод в палеозере, что вызвало увеличение минерализации и количества питательных веществ). В результате произошло относительно быстрое зарастание, то есть эвтрофирование водоема. Разложение значительного количества органического вещества потребовало большого количества кислорода на его окисление. При этом Eh сместился в более восстановительную область. Данный слой отложений является биогенным накопительным геохимическим

барьером, характеризующимся резким увеличением концентрации P, Fe, Mn, Cu, Pb, Ni. В пользу этой гипотезы говорят и данные об относительно высокой скорости седиментации (около 1 мм/год, рис. 2, Б) в этот период. В результате описанных процессов произошло формирование болота на месте палеоозера.

По всем геохимическим показателям хорошо выделяется верхний слой торфяной залежи (15–20 см), сформировавшийся в последние 200–300 лет. Этот слой характеризуется увеличением среднего значения зольности почти в 3 раза по сравнению с основной толщей торфяной части разреза. Для него характерно минимальное значение рН в разрезе (5.0 ± 0.5), повышенное содержание P, K, Pb и низкие (относительно средних значений по разрезу) содержания Fe (в 2 раза), Sr (в 5 раз), Cu (в 3 раза), Ni (в 2 раза).

Средняя (основная) часть разреза представлена торфом и характеризуется относительно стабильным содержанием минерального компонента. Однако по характеру распределения зольности (рис. 3) в этой относительно однородной части залежи можно выделить 4 периода, различающихся по условиям формирования (снизу вверх): 1) 4500–4900 л. н. – зольность практически не изменяется (от 4 до 5%); 2) 3100–4500 л. н. – величина зольности периодически изменяется (от 2 до 9%); 3) 1900–3100 л. н. – зольность практически постоянна; 4) 250–1900 л. н. – незначительные колебания в содержании зольных элементов. Данное разделение подтверждается результатами кластерного анализа (рис. 7), в котором большая часть образцов этих групп имеет явно выраженную взаимозависимость и более тесную связь.

Анализ содержания биогенных веществ по разрезу торфяника позволяет выделить еще несколько характерных особенностей. С 4900 до 3200 л. н. для всех биогенных элементов характерен период относительной стабильности, после которого происходит увеличение содержания всех этих элементов до 2500 л. н. В следующие 500–600 лет происходит существенное уменьшение их содержания. Наиболее благоприятным для роста растений можно считать период около 2400 ± 200 л. н., когда наблюдается максимальное содержание биогенных элементов. Судя по незначительной степени разложения органического вещества в этот период, количество осадков было оптимальным и было достаточно тепло. Некоторое возрастание содержания всей группы биогенных элементов 1800 л. н. скорее всего связано не с климатическими изменениями, а с горением торфяника в этот период – в этом слое обнаружены угли. Это и привело к увеличению содержания элементов, резкому замедлению роста растений, что вызвало небольшое уменьшение концентрации биогенных элементов (восстановление после

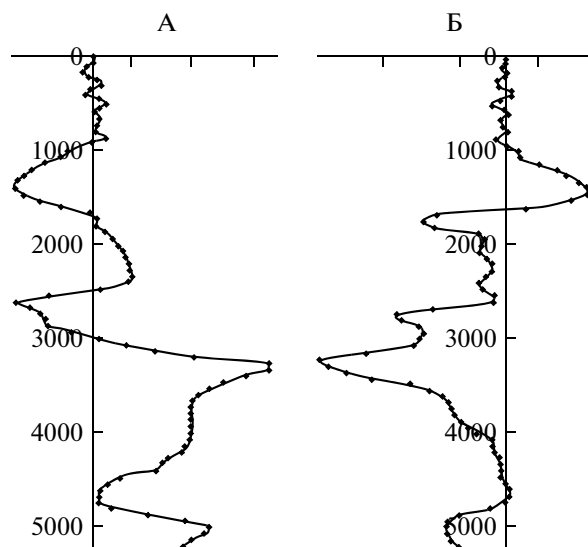


Рис. 6. Кривые изменения температуры (А) и влажности (Б) (в относительных единицах), построенные по палинологическим данным для юга Западной Сибири [3].

пожара). С глубины 75 см (800 л. н.) содержание P заметно возрастает, достигая в современный период тех же значений, что и в оптимальный период – 2400 ± 200 л. н.

Статистическая обработка результатов анализа всех 82 образцов отложений показала наличие значимых корреляций ($R > 0.50$) в 16 случаях (13 положительных корреляций и 3 отрицательных) и только одна из них приближается к 0.7 – зависимость рН от возраста образца.

Для комплексной оценки вклада различных факторов в формирование торфяника проведен факторный анализ методом главных компонент. Анализ 82 образцов по 17 независимым показателям (табл. 2) показал, что наиболее значимо влияние первого фактора (4.84) на группу взаимосвязанных показателей. Этот фактор повлиял на 9 из 17 характеристик, из них 5 – превышают 0.7. Определяется отрицательная корреляция от содержания K, Sr, Cd, в меньшей степени от относительной влажности, Eh, содержания Zn; положительная корреляция – от времени образования торфа, относительной температуры, в меньшей степени от рН. Можно предположить, что возраст слоя и изменение температуры определяют изменчивость этих показателей: в процессе накопления торфа уменьшается значение рН, то есть происходит подкисление торфа, и соответственно – увеличивается содержание большинства металлов и относительная влажность.

Второй фактор оказывает существенное влияние только на 3 показателя – на содержание Fe, Mn и Ni (их концентрация уменьшается) и в меньшей степени – на зольность (она возрастает).

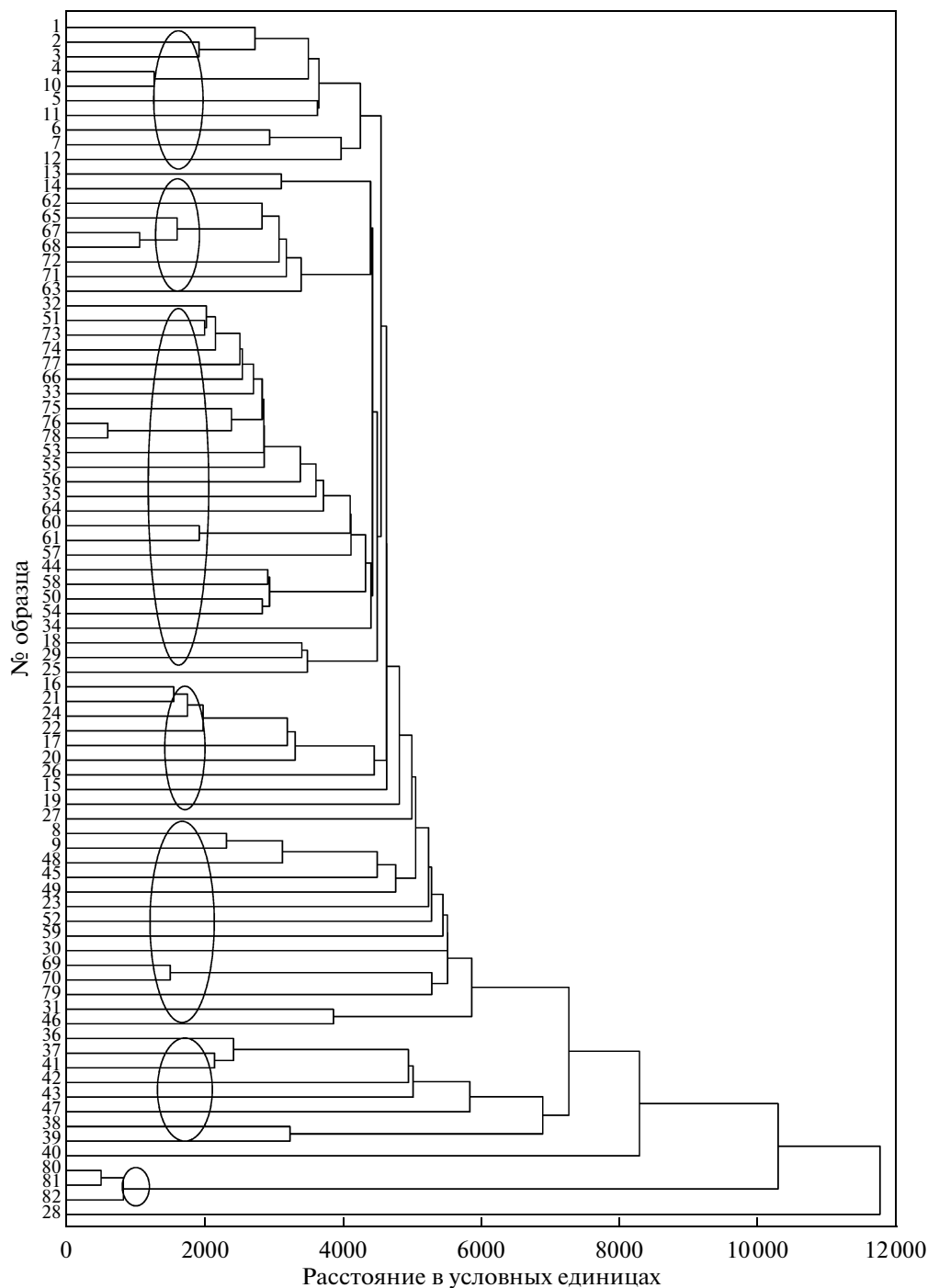


Рис. 7. Дендрограмма образцов торфа Сартамского яра по геохимическим показателям.

ет), Р и Си (их содержание убывает). Относительно низкая доля объяснимой дисперсии и примерно одинаковый вклад обоих факторов объясняется высокой вариабельностью геохимических параметров по разрезу и является косвенным подтверждением различий в климатических условиях формирования торфяной залежи. В связи с этим представляется необходимым рассмотрение отдельных периодов в формировании торфа, вы-

деленных с учетом меняющихся условий его формирования.

Для каждого из выделенных горизонтов проведен факторный анализ по 17 показателям с учетом климатических характеристик, выраженных в относительных единицах.

Для всех горизонтов наиболее значимым является первый фактор, хотя вклад его в общую дис-

Таблица 2. Результаты факторного анализа верхового торфяника Сартамский рям. Над чертой – первый, под чертой – второй факторы. Полу жирным шрифтом выделены наиболее значимые факторы (>0.7)

Показатель	Возраст, лет назад						
	0–5200	0–250	350–1500	1500–3100	3100–4300	4300–4900	5000–5200
Количество образцов, <i>n</i>	82	5	19	24	18	10	3
Возраст образца	0.84 /–0.28	0.99 /–0.09	0.97 /–0.01	0.25/ 0.91	0.84 /–0.12	–0.8/0.49	0.99 /0.01
Зольность	0.49/0.51	–0.98 /0.10	0.18/ 0.88	0.82 /0.11	–0.15/ –0.84	0.93 /–0.31	0.62/ 0.78
<i>T</i> отн.	0.78 /–0.04	–0.84 /–0.20	–0.91 /–0.19	–0.24/–0.27	–0.65/0.27	0.30/–0.68	–0.99 /–0.11
Влажность относительная	–0.54/0.35	–0.28/0.34	0.89 /0.28	–0.59/–0.54	0.75 /–0.04	0.44/0.72	0.96 /–0.27
Eh	–0.59/0.38	–0.00/0.63	–0.18/–0.54	0.15/–0.03	0.68/–0.42	0.80 /0.33	0.99 /–0.16
pH	0.62/–0.10	–0.85 /–0.23	0.37/–0.12	0.29/0.32	0.78 /–0.25	–0.56/0.20	0.13/ 0.99
Электропроводность, К	–0.28/–0.07	–0.90 /–0.42	–0.36/–0.49	0.20/–0.18	0.69/0.08	0.12/–0.15	–0.21/ –0.98
P	–0.16/–0.53	–0.86 /0.22	–0.81 /0.18	0.16/ 0.88	0.05/ 0.91	–0.91 /–0.06	0.42/ 0.91
K	–0.70 /–0.10	–0.79 /0.06	0.19/0.42	–0.82 /0.02	0.15/0.62	–0.72 /0.34	0.61/ –0.79
Fe	–0.35/ –0.78	0.99 /–0.01	0.37/–0.56	–0.95 /0.20	–0.65/0.34	–0.90 /–0.06	–0.99 /0.07
Mn	0.10/ –0.79	–0.93 /0.27	0.86 /–0.25	–0.88 /0.31	0.81 /0.33	–0.92 /0.19	–0.71/ 0.71
Sr	–0.71 /–0.37	0.87 /–0.22	0.80 /–0.31	–0.71 /–0.30	0.12/ 0.77	–0.65/0.57	0.82 /–0.58
Zn	–0.67/0.14	–0.01/ –0.96	0.34/–0.54	–0.47/ 0.76	0.67/0.46	0.62/–0.28	–0.67/–0.74
Cu	–0.04/–0.56	0.41/ –0.91	0.06/–0.15	0.08/–0.30	0.81 /–0.23	–0.70/–0.57	–0.80 /0.60
Ni	0.27/ –0.73	–0.54/ –0.72	0.31/–0.20	–0.44/0.50	0.25/ 0.75	–0.57/–0.65	–0.93 /–0.37
Pb	0.07/–0.28	–0.46/–0.02	–0.02/–0.59	0.38/ 0.70	0.10/0.54	–0.67/0.37	–0.75 /–0.66
Cd	–0.71 /–0.19	–0.90 /–0.19	–0.49/–0.35	–0.40/ 0.77	–0.34/0.07	–0.07/0.62	–0.97 /0.23
Собственные числа	4.84/3.26	9.70/3.29	5.56/2.94	4.90/4.34	5.68/4.19	7.94/3.32	10.53/6.47
% объяснимой дисперсии	28/19	57/19	33/17	29/25	33/25	47/20	62/38

персию системы существенно зависит от рассматриваемого горизонта. Так, в верхнем горизонте доля объяснимой дисперсии первого фактора составляет 57%, второго – 19%. Столь же существенное преобладание первого фактора и в двух нижних горизонтах – 47 и 62%, соответственно. Слои, характеризующие как верховой и переходный торф, имеют близкие значения объяснимой дисперсии для обоих факторов.

В верхнем горизонте (0–250 л. н.) первый фактор свидетельствует, что с увеличением возраста (сверху вниз) увеличивается концентрация Fe и Sr. Величины зольности, pH, X, P, K, Mn и Cd, наоборот, возрастают к поверхности (снизу вверх). Второй фактор вероятно в большей степени определяется окислительно-восстановительной обстановкой – он связан с ростом Eh и уменьшением содержания Zn, Cu, Ni.

Во втором выделенном горизонте (350–1500 л. н.) первый фактор также определяется возрастом образцов, климатическими условиями (относительная температура сверху вниз уменьшается, а влажность растет), уменьшением содержания P и

ростом содержания Mn, Sr. Второй фактор, вероятнее всего, связан с ростом зольности и уменьшением Eh и концентрации Fe, Zn, и Pb.

В горизонте, образовавшемся 1500–3100 л. н., доли объяснимой дисперсии обоих факторов невелики и примерно одинаковы. Фактор определяется ростом зольности, тенденцией уменьшения влажности и значимым уменьшением содержания K, Fe, Mn, Sr. Второй фактор преимущественно определяется возрастом образцов (глубиной их залегания), уменьшением влажности и ростом концентрации P, Zn и Cd.

Следующий горизонт (3100–4300 л. н.), отнесенный к переходному типу торфа, также не имеет абсолютного преобладания одного из факторов и его формирование определяется, вероятно, глубиной залегания образца (возрастом), уменьшением относительной температуры (сверху вниз), увеличением относительной влажности, а также ростом величин Eh, pH, K. При этом концентрация Mn, Zn и Cu возрастает, а Fe уменьшается. Второй фактор связан с зольностью и ростом содержания P, K, Se, Ni, Pb.

Горизонт, сформировавшийся 4300–4900 л. н., отнесенный к низинному типу торфа, характеризуется существенным преобладанием влияния первого фактора (47%), которое связано с возрастанием (снизу вверх) зольности и содержания Zn, при этом содержание P, K, Fe, Mn, Sr, Cu, Ni и Pb уменьшается. Второй фактор определяется уменьшением относительной температуры и влажности, накоплением Sr и Cd и уменьшением концентрации Cu и Ni.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопоставляя литературные данные, датировки и характеристику климатических условий для этой местности с полученными нами геохимическими данными, можно отметить следующие общие закономерности:

1) До 5100 л. н. на месте торфяника существовало палеозеро.

2) В период 4900–5000 л. н. произошли резкие, вероятнее всего, климатические изменения, приведшие к эвтрофированию озера, его дальнейшему зарастанию и образованию низинного торфяника.

3) Период 4300–4900 л. н. характеризуется постоянной и относительно высокой ($5.3 \pm 1.0\%$) для данного торфяника величиной зольности, низкой скоростью осадконакопления, смещением величины pH в кислую область, ростом Eh; содержание P, K, Fe, Zn, концентрация Ni и Cu уменьшается, содержание Cd изменяется незначительно, но к концу данного периода резко возрастает. Около 4500 л. н., возможно, условия снова изменились, но на относительно небольшой период. По литологическому описанию в данном слое были обнаружены неразложившиеся остатки осоки, встречаются береста и кора. По основным геохимическим характеристикам данный слой торфа можно отнести к низинному типу, но по существующей в настоящее время классификации, зольность данного слоя относительно невелика.

4) В период 3100–4300 л. н. наблюдаются заметные колебания в содержании минеральных веществ, существенные изменения в геохимической обстановке (до 3700 л. н. смещение pH в кислую область и Eh в восстановительную область, затем сменившиеся противоположными процессами). При этом содержание биогенных элементов и металлов (по сравнению с предыдущим периодом) изменилось незначительно, и было относительно стабильным. В этот интервал времени критическая ситуация была примерно 3500–3750 л. н., когда наблюдалось значительное подкисление торфа и смещение Eh в восстановительную область (минимальное значение Eh по разрезу), увеличение концентрации некоторых

металлов (особенно Ni и Cd). Возможно, данный слой торфа можно отнести к переходному типу, так как средняя зольность слоя составляет $3.9 \pm 0.6\%$, а pH – 5.37 ± 0.16 .

5) 1500–3100 л. н. зольность торфа имела минимальные и наиболее стабильные значения. Среднее значение зольности составляет $2.0 \pm 0.3\%$, при этом большую часть периода незначительно изменяется количество растворимых веществ, практически не изменяется Eh. Величина pH нестабильна. На этот временной отрезок приходится оптимумы в содержании большинства исследованных биогенных веществ и некоторых микроэлементов (Fe, Mn, Sr, Zn, Ni, Cd) особенно в период 2400 ± 200 л. н.

6) Для периода 350–1500 л. н. в распределении зольности происходят заметные колебания, при низком ее содержании в торфе. Изменение pH в этом слое имеет тенденцию к устойчивому подкислению (здесь наблюдаются минимальные значения pH по разрезу). Eh имеет максимальные значения по разрезу и изменяется незначительно. Содержание P незначительно и мало изменяется в основную часть периода и только последние 800 лет наблюдается тенденция к его накоплению. Содержание K также стабильно большую часть периода, резкий, но кратковременный рост его содержания наблюдается около 500 л. н. Этот период характеризуется относительно низкой концентрацией Cu, Mn и Fe, высокой концентрацией Zn и Sr. Содержание Pb и Cd изменяется в широких пределах. Концентрация Cd дважды достигает максимальных значений по разрезу – 900 и 500 л. н.

7) Последние 200–300 лет характеризуются существенным возрастанием зольности торфа, смещением pH в нейтральную область, ростом запасов K и в меньшей степени P. Содержание Mn, Pb, в меньшей степени Cd, Ni растет, содержание остальных элементов изменяется незначительно, с тенденцией к уменьшению.

Результаты факторного анализа подтверждают предположение о различиях рассматриваемых горизонтов, которые в ряде случаев напрямую связаны с климатическими условиями региона. Высокая степень вариабельности объяснимой дисперсии в рассматриваемых горизонтах подтверждает тезис об изменении условий их формирования, в том числе климатических.

Обращает внимание, что в горизонтах 0–250 и 3100–4300 л. н. с увеличением возраста (сверху вниз) зольность уменьшается, а в горизонтах, сформированных 350–1500 и 1500–3100 – увеличивается. В горизонте низинного торфа (4300–4900 л. н.) зольность растет с уменьшением возраста (то есть снизу вверх). Это, вероятно, может служить подтверждением различных условий их формирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Архипов В.С., Бернатонис В.К., Резников В.И.* Распределение железа, кобальта, хрома в торфяных залежах Центральной части Западной Сибири // Почвоведение. 2000. № 12. С. 1439–1447.
2. *Водяницкий Ю.Н.* Роль соединений железа в закреплении тяжелых металлов и металлоидов в почвах (обзор литературы) // Почвоведение. 2010. № 5. С. 558–572.
3. *Ефремова Т.Т., Ефремов С.П., Куценогий К.П.* Биохимия Fe, Mn, Cr, Ni, Co, Ti, V, Mo, Ta, W, U в низинном торфянике на междуречье Оби и Томи // Почвоведение. 2003. № 5. С. 557–567.
4. *Зах В.А., Зимина О.Ю., Рябогина Н.Е., Скочина С.Н., Усачева И.В.* Ландшафты голоцена и взаимодействия культур в Тоболо-Ишимском междуречье. Новосибирск: Наука, 2008. 212 с.
5. *Иванов И.В., Чернянский С.С.* Общие закономерности развития черноземов Евразии и эволюция черноземов Зауралья // Почвоведение. 1996. № 9. С. 1045–1055.
6. *Кац Н.Я., Кац С.В.* Об эволюции ландшафта южной части Западной Сибири по данным изучения торфяников // Тр. конф. по спорово-пыльцевому анализу 1948 г. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1950. С. 63–79.
7. *Ларина Н.С., Елфимова Г.А., Ларин С.И., Юферева Е.С.* Изменчивость содержания различных форм тяжелых металлов в верховых торфяниках Ишимской равнины в голоцене // Вестник Тюм. гос. ун-та. 2004. № 3. С. 38–45.
8. *Ларина Н.С., Ларин С.И., Заботина О.Н.* Динамика изменения содержания тяжелых металлов в верховых торфяниках юга Тюменской области // Успехи естествознания. 2004. № 10. С. 132–135.
9. *Ларина Н.С., Ларин С.И., Моисеенко Т.И.* Геохимическая дифференциация профиля торфяной залежи в индикации условий ее формирования в голоцене // Геохимия. 2013. № 2. С. 145–155.
10. *Левина Т.П., Орлова Л.А.* Климатические ритмы голоцена юга Западной Сибири // Геология и геофизика. 1993. Т. 34. № 3. С. 38–55.
11. *Лисс О.Л., Абрамова Л.И., Аветов Н.А.* Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение. Тула: Гриф и К°, 2001. 584 с.
12. *Московченко Д.В.* Микроэлементный состав верховых торфяников Тюменской области как индикаторный показатель загрязнения // Проблемы природопользования в районах со сложной экологической ситуацией. Тюмень: Изд-во Тюм. гос. ун-та, 2003. С. 110–111.
13. *Орлова Л.А.* Голоцен Барабы (стратиграфия и радиоуглеродная хронология). Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990. 128 с.
14. Руководство по изучению новейших отложений / Под ред. Г.А. Каплина. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987. 238 с.
15. *Kéiko Hattori, Stewart Hamilton.* Geochemistry of peat over kimberlites in the Attawapiskat area, James Bay Lowlands, northern Canada // Applied Geochemistry. 2008 V. 23. Iss. 12. P. 3767–3782.
16. *Silamikele I., Klavins M., Nikodemus O.* Major and trace element distribution in the peat from ombrotrophic bogs in Latvia // J. of Environmental Science and Health. Part A. 2011. V. 46. P. 805–812.
17. *Graeme T. Swindles, Gill Plunkett, Helen M. Roe.* A delayed climatic response to solar forcing at 2800 cal. BP: multiproxy evidence from three Irish peatlands // The Holocene. 2007. V. 17. № 2. P. 177–182.
18. *Franzén L.G. and Cropp R.A.* The peatland ice age. Hypothesis revised, adding a possible glacial pulse trigger // Geogr. Ann. 2007. V. 89 (A). № 4. P. 301–330.
19. *Franzén L.G.* Mineral matter, and major and trace elements, in raised bog peat. A case study from south Sweden, Ireland and Tierra del Fuego, Argentina // Peatlands: evolution and records of environmental and climatic changes / Eds.: I.P. Martini, A. Martinez Cortizas and W. Chesworth. 2006. T. 9. P. 241–269.
20. *Shotyk W., Weiss D., Heisterkamp M., Cheburkin A.K.* New peat bog record of atmospheric lead pollution in Switzerland: Pb concentrations, enrichment factors, isotopic composition, and organolead species // Environmental Science and Technology. 2002. № 18. P. 3893–3900.