

## ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТОРФЯНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ ОЛИГОТРОФНЫХ БОЛОТ ЮЖНО-ТАЕЖНОЙ ЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2021 г. Е. Э. Веретенникова<sup>a, b, \*</sup>, И. В. Курьина<sup>a</sup>, Е. А. Дюкарев<sup>a, c</sup>,  
Е. А. Головацкая<sup>a</sup>, С. В. Смирнов<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,  
просп. Академический, 10/3, Томск, 634055 Россия

<sup>b</sup>Сибирский государственный медицинский университет, Московский тракт, 2, Томск, 634050 Россия

<sup>c</sup>Югорский государственный университет, ул. Чехова, 16, Ханты-Мансийск, 628011 Россия

\*e-mail: lena2701@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.05.2019 г.

После доработки 10.03.2020 г.

Принята к публикации 11.03.2020 г.

Исследованы геохимические особенности и условия формирования торфяных залежей трех типичных для подзоны южной тайги Западной Сибири олиготрофных болот. Данная работа проведена с учетом комплекса факторов, влияющих на развитие торфяных залежей, – геоморфологического положения в ландшафте и особенностей подстилающих пород. Проанализированы физико-химические свойства торфов, а также содержание и распределение ряда химических элементов в профиле торфяных залежей. Показано, что влияние геоморфологического фактора отразилось на различном соотношении слоев торфа разного типа в торфяных залежах. Состав подстилающих пород повлиял на концентрацию химических элементов в торфе и распределение их внутри профиля. С помощью факторного анализа на основе корреляционной матрицы методом главных компонент выявлены основные ассоциации химических элементов в каждой торфяной залежи исследуемых болот. Показано, что на их распределение в торфяных залежах оказывает дифференцированное влияние комплекс факторов: эндогенное поступление из подстилающих пород и грунтовых вод (для элементов Ca, Fe, Ti, Ni, Cu, Co, Cr, Ba, Cd, Sr), активность окислительно-восстановительных процессов (Mn, Pb, Fe), редокс-независимые процессы растворения и мобилизации элементов корнями растений (Ca, Cu, Fe), интенсивность разложения торфа (Mn, Pb, отношение C/N), уровень обводненности болота (отношение C/N), экзогенный привнос из атмосферы примесей техногенных веществ в результате человеческой деятельности (Pb).

**Ключевые слова:** торфяная залежь, олиготрофное болото, химические элементы, подстилающие породы, водно-минеральное питание, зольность, разложение органического вещества, отношение C/N, Западная Сибирь

**DOI:** 10.31857/S0016752521050095

Западная Сибирь – уникальный регион, лидирующий во всем мире по масштабам проявления заболачивания, которое наблюдается и в настоящее время. Согласно данным (Нейштадт, 1972; Пологова, Лапшина, 2002; Курьина, Веретенникова, 2015) скорость вертикального прироста торфа изменяется от 0.39 до 2.62 мм/год, а скорости прироста площади болот достигают 100 км<sup>2</sup>/год. С учетом масштабов заболачивания и его прогрессивного темпа, болотные экосистемы стали важнейшим современным средообразующим фактором, определяющим направленность и протекающие различные природных процессов в регионе.

В настоящее время число исследований, касающихся геохимии болотных экосистем Западной

Сибири, с каждым годом растет, и они весьма разноплановы, как в отношении исследуемых объектов, так и в отношении применяемых подходов к их изучению. На сегодняшний день значительное количество работ сфокусировано на отслеживании загрязнения атмосферы, местной экологической истории, и, как правило, в таких исследованиях делается акцент на важность атмосферного осаждения минеральных частиц и элементов-примесей в разных торфяных болотах, в основном испытывающих техногенную нагрузку (Mezhibor et al., 2009, 2013). Большое внимание уделяется и болотным экосистемам, находящимся в естественном состоянии. В этом направлении имеется ряд работ, в которых приводятся сведения о среднем содержании элементов в торфах,

отобранных на различных месторождениях Томской области, рассматриваются особенности содержания и распределения химических элементов в торфах разного ботанического состава (Архипов др., 1988; Инишева, Цыбукова, 1999; Арбузов и др., 2009; Веретенникова, 2013). В некоторых работах сделан упор на изучение отдельных элементов в профиле торфяных залежей, например, Ca, Fe, Mn (Архипов, Бернатонис, 2013, 2015), Pb (Veretennikova, 2015). Имеются сведения о содержании химических элементов в профиле торфяных залежей наиболее распространенных типов болот, расположенных в различных климатических зонах Западной Сибири (от лесостепи до тундры) с применением пространственно-временного подхода (Московченко, 2006; Stepanova et al., 2015). В настоящее время все больше внимания уделяется изучению минерального состава торфяных залежей (Прейс 2010; Rudmin et al., 2018; Arbuzov et al., 2018; Savichev et al., 2020).

Геохимические особенности болотных ландшафтов следует рассматривать как комплексный процесс (Chagué-Goff et al., 1996), который складывается под воздействием ряда факторов, таких как изменение климата и растительности в течение голоцена, характер и состав подстилающих пород и вод, формирующих водно-минеральное питание (например, Лукашев и др., 1971; Ковалев, 1985; Матухина, Попова, 2001; Ларина и др., 2013, 2014; Steinmann, Shotyk, 1997; Mäkilä et al., 2015). Наряду с перечисленными глобальными экзогенными факторами, в процессе развития болот внутри них самих складываются специфические геохимические условия, обусловленные сложным комплексом физико-химических и биологических процессов, воздействие которых проявляется в особенностях распределения химических элементов в торфяной залежи. Минеральные вещества, попадая в торфяные залежи (с атмосферными осадками, грунтовыми и поверхностными водами), проходят стадии диагенетического преобразования, приводящие к перераспределению химических элементов внутри торфяной залежи. В этом перераспределении ведущую роль играют: органическое вещество торфа (скорость его деструкции и накопления), окислительно-восстановительные процессы, микробиологические условия, кислотность среды, уровень обводненности болота, а также химические свойства самих элементов, поведение которых может меняться в зависимости от условий болотной среды, определяя их биогенное накопление или миграцию (Ковалев, 1985; Савичев и др., 2019; Bergkvist, 1987; Steinmann, Shotyk, 1997; Derome, Nieminen, 1998; Biester et al., 2012; Savichev et al., 2020).

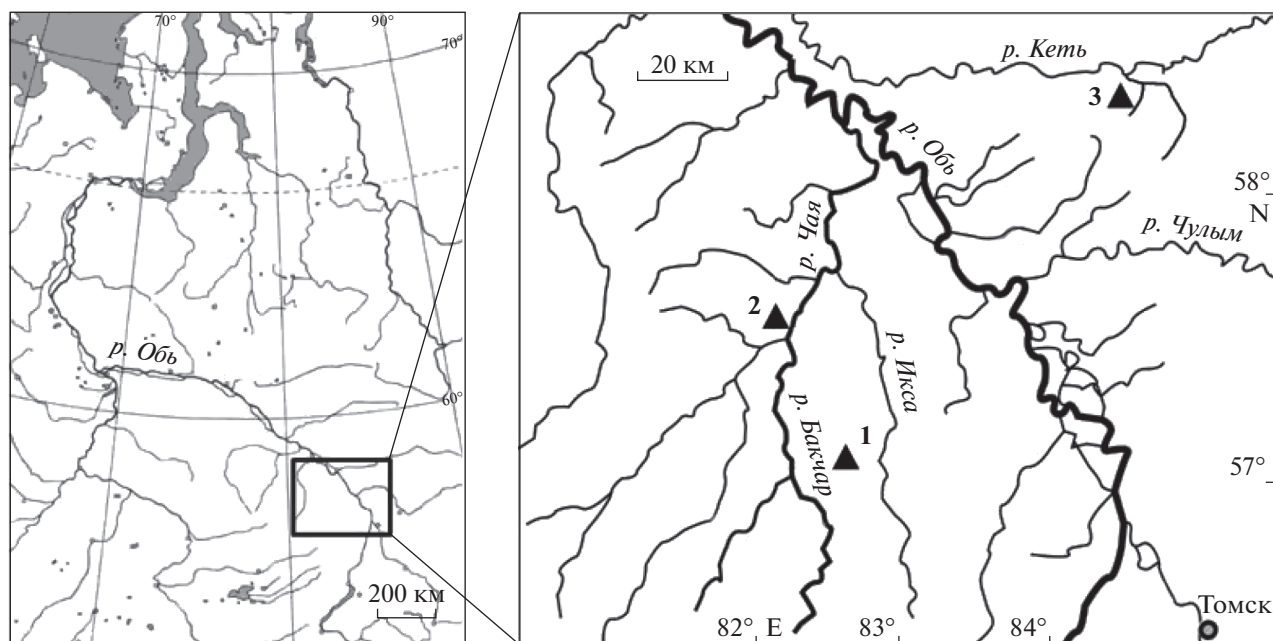
Большинство болот Западной Сибири олиготрофные, то есть прошли длительный путь развития до стадии, когда их питание осуществляется за счет атмосферных осадков, в то время как минеральные подстилающие породы погребены

внутри и уже не могут влиять на современное состояние и развитие этих болот. На поверхности олиготрофных болот таежной зоны наиболее распространен сосново-кустарничково-сфагновый тип растительности (или рям) (Лисс и др., 2001). Несмотря на поразительное однообразие их современного внешнего облика, эти болота занимают разные формы рельефа (водораздельные пространства, террасы, долины древних рек, депрессии), формируются на разных по составу подстилающих породах, и, надо полагать, что и геохимические процессы в таких болотах индивидуальны в каждом конкретном случае, поскольку болотный процесс вызывает коренную перестройку геохимической системы даже при относительно небольших изменениях параметров среды (Ковалев, 1985).

В данной работе авторы проводят комплексную геохимическую оценку торфяных залежей трех разных болотных экосистем. По своим характеристикам болота типичны для таежной зоны Западной Сибири. Географически два из выбранных болот расположены на левом берегу р. Обь, а третье – на правом берегу. Геохимическая оценка основана на выявлении особенностей содержания и распределения ряда химических элементов (Ca, Fe, Ti, Sr, Ba, Mn, Cu, Ni, Co, Cr, Pb, Cd) в торфяных залежах, а также определении факторов, оказавших преимущественное влияние на особенности внутрипрофильной дифференциации химических элементов. Поскольку существует четкое разделение правобережья и левобережья р. Обь по химическому составу подстилающих пород и минерализации природных вод, питающих торфяные болота (Савичев, 2010; Евсева и др., 2012), это определило еще один аспект нашего исследования – проведение геохимической оценки с учетом природных особенностей, оказавших влияние на развитие болотных экосистем.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Район исследования относится к южно-таежной подзоне Западной Сибири. Объектами исследований являются три торфяные залежи, расположенные на разных болотных массивах (рис. 1). Первая торфяная залежь находится на болоте “Бакчарское”, которое занимает территорию водораздела в междуречье рек Икса и Бакчар (Бакчарский район, окрестности д. Польшанка, 82°36' с.ш., 56°58' в.д.) и относится к юго-восточным отрогам Васюганского болота. Вторая торфяная залежь исследована на болоте “Кинзяровское”, расположенном на второй надпойменной террасе р. Чай (Чаинский район, окрестности пос. Усть-Бакчар, 82°18' в.д., 57°38' с.ш.). Третья торфяная залежь расположена на болоте “Центральное” (Верхнекетский район, окрестности поселка Нибегинский, 84°55' с.ш., 58°18' в.д.). Болото Центральное расположено в ложбине древнего стока на левом



**Рис. 1.** Карта-схема района исследований и пункты расположения объектов исследования. 1 – болото “Бакчарское”, 2 – болото “Кинзяровское”, 3 – болото “Центральное”.

берегу р. Суйга, являющейся левобережным притоком р. Кеть. Все три исследованных болотных участка характеризуются идентичным с флористической точки зрения современным растительным покровом – сосново-кустарничково-сфагновым фитоценозом. Среди болот южной тайги данный тип фитоценоза является господствующим (Лисс и др., 2001).

На каждом исследуемом болоте сотрудниками Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН во время экспедиционных выездов были отобраны образцы торфа полойно с интервалом 10 см, включая подстилающую породу торфяным геологическим буром ТГБ-1. Все отобранные образцы из торфяных колонок прошли ряд анализов.

Определение ботанического состава торфа выполнено д. б. н. Е.М. Волковой (Тульский государственный университет, г. Тула) по стандартной методике (Кац и др., 1977). Зольность торфа определена в соответствии с ГОСТ – 11306-83. Степень разложения торфов оценивалась по величине отношения C/N. Для этого выполнено определение валового содержания углерода и азота, согласно (Пономарева, Плотнокова, 1975). На основании полученных результатов рассчитано отношение C/N для каждого слоя торфяной залежи.

Валовое содержание элементов (Ca, Fe, Ti, Sr, Ba, Mn, Ni, Co, Cr, Pb, Cd) в торфяных образцах и подстилающей торфяную залежь породе определено количественным атомно-эмиссионным анализом на кварцевом спектрографе СТЭ-1 с трехлинзовой системой освещения щели с рабочим

диапазоном 200–600 нм. согласно аттестованной методике (Методика количественного .., 1993) в лаборатории минералогии и геохимии Томского государственного университета (аналитик к. т. н. Е.Д. Агапова). Для этого образцы торфа подвергались предварительному озолению, затем помещались в кратер угольного электрода (диаметр 4 мм, глубина 4 мм) и анализировались в дуге переменного тока. В качестве источника возбуждения спектров применяется генератор ИВС-29.

Возраст торфяных отложений установлен по  $^{14}\text{C}$  в Институте геологии и геофизики СО РАН (аналитик Л.А. Орлова) и в Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (аналитик Г.В. Симонова) на ультранизкофоновом жидкостинтиллиационном спектрометре QUANTULUS 1220 фирмы Wallac, Финляндия. Всего получено 14 датировок (табл. 1). Полученные даты откалиброваны при помощи калибровочной кривой IntCal13 (Reimer et al., 2013). На основании полученных дат была построена модель “глубина-возраст” в среде R (R Core Team, 2012) с использованием пакета clam (Blaauw, 2010).

Статистическая обработка данных включала оценку исследуемых характеристик с помощью описательных статистик, а также корреляционный и факторный анализы. Факторный анализ выполнен на основе корреляционной матрицы методом главных компонент. Интерпретация результатов факторного анализа осуществлена согласно значениям нагрузок, которые, по сути, являются коэффициентами корреляции между выделенными компонентами и переменными.

**Таблица 1.** Данные радиоуглеродного датирования торфяных отложений болот

Глубина, см	Лабораторный номер	Возраст, $^{14}\text{C}$ л.н.	Калиброванный возраст, к.л.н.
Торфяная залежь на болоте “Бакчарское”			
40–50	ИМКЭС-14С219	105 ± 20	130
90–100	СОАН-7867	1695 ± 85	1602
140–150	СОАН-7868	2075 ± 70	2056
180–190	СОАН-7869	2637 ± 55	2762
Торфяная залежь на болоте “Кинзяровское”			
50–60	ИМКЭС-14С1088	106 ± 40	142
190–200	ИМКЭС-14С1103	2410 ± 172	2470
230–240	ИМКЭС-14С718	3102 ± 64	3302
240–250	ИМКЭС-14С1090	4609 ± 94	5297
260–270	ИМКЭС-14С761	6310 ± 109	7215
Торфяная залежь на болоте “Центральное”			
40–50	ИМКЭС-14С881	160 ± 85	167
90–100	ИМКЭС-14С894	1175 ± 86	1082
140–150	ИМКЭС-14С891	1307 ± 90	1239
190–200	ИМКЭС-14С882	2743 ± 54	2849
210–220	ИМКЭС-14С887	4552 ± 78	5196

Переменные, более тесно коррелирующие с данным фактором, чем с другими, формируют его ядро, а сами компоненты ранжируются согласно степени влияния, которая оценивается по их вкладу в общую дисперсию. Статистическая обработка результатов проведена при помощи программных приложений STATISTICA 10 (StatSoft), SigmaStat 6 (Systat Software, Inc). Общее число торфяных проб в изученных выборках составило: болото Бакчарское – 19, болото Кинзяровское – 27, болото Центральное – 23.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Основные характеристики торфяных залежей

Современный растительный покров всех исследуемых торфяных залежей представлен сосново-кустарничковым сфагновым фитоценозом. В моховом покрове доминирует сфагнум фускум, кустарничковый ярус представлен кассандрой, багульником и андромедой, древесный – низкорослой сосной. На основании данных по радиоуглеродному датированию (табл. 1) и мощности торфяной залежи построены модели “Глубина–Возраст” (рис. 2).

**Болото Бакчарское** сформировано на карбонатных суглинках и глинах. Торфяная залежь в месте бурения имеет мощность 180 см, возраст придонного слоя составляет 2800 калиб. лет. Согласно возрастной модели скорость торфонакопления имела различные темпы: эвтрофная стадия развития болота характеризовалась медленной скоростью торфонакопления (0.42 мм/год), затем скорость торфонакопления резко возросла (1.16 мм/год), болото перешло в мезотрофную стадию. Интервалу времени с 1270 л.н. по настоящее время соответствует олиготрофная стадия развития болота, во время которой скорость торфонакопления менялась от 0.36 до 1.74 мм/год.

Торфяная залежь **болота Кинзяровское**, мощностью 270 см в точке бурения, имеет возраст 7200 калиб. лет, так же, как и торфяная залежь на Бакчарском болоте, подстилается карбонатными суглинками. Особенностью торфяной залежи болота Кинзяровское является наличие в ее основании мощного слоя (около 170 см) торфа низинного типа, который формировался на протяжении длительного временного интервала (6000 лет). Скорость торфонакопления на этом этапе изменялась от 0.11 до 0.71 мм/год, постепенно возрастая по мере роста торфяной залежи вверх. Тонкая прослойка торфа переходного типа (мощностью около 20 см) указывает на переход болота в мезотрофную стадию, которая длилась примерно 200 лет; скорость торфонакопления в этот период составила 0.71 мм/год. Затем болото перешло в олиготрофную стадию примерно 800 л.н., скорость торфонакопления в этот период увеличилась и составила в современный период – 1.90 мм/год.

Торфяная залежь на **болоте Центральное** имеет мощность 220 см, начало отложения торфа датируется возрастом 5200 калиб. лет. Залежь почти полностью представлена верховыми торфами. Выявлена очень низкая скорость торфонакопления на начальном этапе развития болота (0.04 мм/год). В таких условиях более чем за 1000 лет было сформировано всего 10 см низинного торфа. Затем, в период с 3600 л. н. скорость торфонакопления постепенно увеличивалась, но оставалась все еще достаточно низкой (0.18 мм/год). Болотообразовательный процесс в это время протекал по мезотрофному типу, что привело к формированию тонкой прослойки переходного торфа. В период с 2850 л. н. торфяная залежь переходит в олиготрофную стадию, которая продолжается по настоящее время. Скорость торфонакопления за этот период постоянно увеличивалась, и более значительных темпов до-

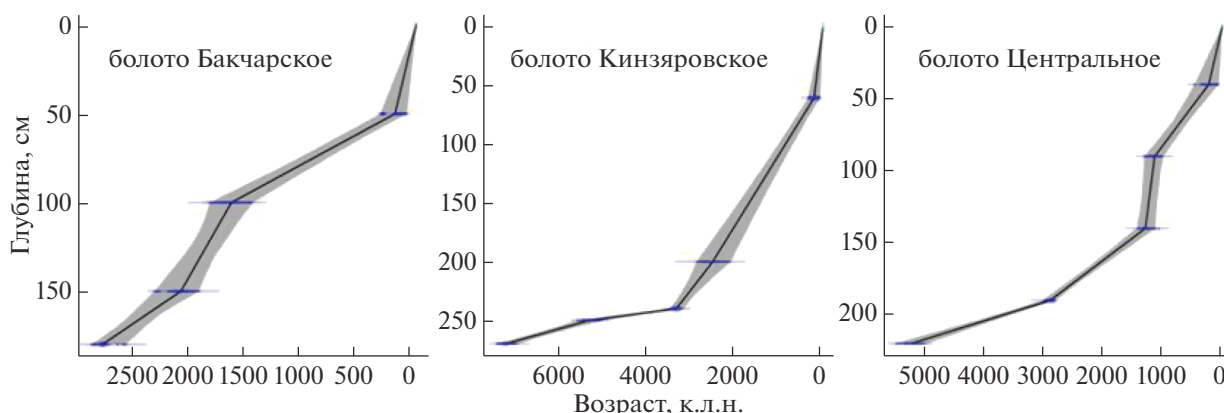


Рис. 2. Модели «Глубина–Возраст» для торфяных залежей, полученные на основании откалиброванных углеродных датировок (см. табл. 1).

стигла к 1000 л.н., а в течение последних 200 лет темпы накопления торфа составляют 2.44 мм/год.

#### *Зольность и степень разложения торфов, слагающих профиль торфяных залежей*

Для более корректного сопоставления торфяных залежей друг с другом нами проведено сравнение средних значений зольности для каждого типа торфа, слагающего профили торфяных залежей.

Зольность торфа Бакчарского болота изменяется от 1.71 до 11.88%, ее величина четко дифференцирована по профилю (рис. 3): зольность низинных торфов изменяется от 7.28 до 11.88% (при среднем  $9.70 \pm 1.97$ ), максимальные значения приходится на придонные слои, зольность переходного торфа – от 3.12 до 6.76% (при среднем значении  $5.21 \pm 1.37$ ), верхового – от 1.71 до 3.05% (при среднем  $2.43 \pm 0.42$ ). Зольность торфяной залежи на болоте Кинзяровское характеризуется меньшими значениями по сравнению с болотом Бакчарское и изменяется в диапазоне от 1.37 до 8.23%. Наиболее высокие значения характерны для низинных торфов, находящихся непосредственно на контакте с подстилающими породами (8.20–6.20%) и они меньше, чем значения зольности низинных торфов на болоте Бакчарское. Так, величина зольности низинных торфов на болоте Кинзяровское на глубине 230–110 см изменяется от 5.20 до 1.39% (при среднем значении –  $2.63 \pm 1.33$ ), что количественно соответствует величине зольности переходных торфов Бакчарского болота. Зольность переходных торфов в среднем составила 1.64%, а верховых немногим меньше –  $1.42 \pm 0.23\%$ . Торфяная залежь на болоте Центральное на всем своем протяжении сложена торфами с низкой зольностью (от 1.00 до 1.80% при среднем  $1.40 \pm 0.22$ ). Придонные слои торфяной залежи на контакте с минеральным субстратом характеризуются более высокими значениями зольности от 9.30 до 10.80%.

В качестве меры разложения органического вещества торфа использован биомаркер, представляющий собой отношение углерода к азоту (C/N). Низкие значения отношения указывают на высокие темпы разложения органического вещества (т.е. потерю углерода) в более сухие периоды во время снижения уровня болотных вод. Высокие значения C/N, наоборот, соответствуют периодам с более высокой обводненностью на болоте, вследствие чего происходит консервация органического вещества, и процесс разложения в таких условиях протекает медленнее. Поэтому изменение отношения C/N очень часто используется в качестве индикатора изменения гидрологических условий на болоте (Kuhry, Vitt, 1996; Malmer, Wallen, 2004; Biester et al., 2012). Этот показатель имеет большое значение в интерпретации профильного распределения химических элементов, так как процесс разложения может оказывать существенное влияние на постсадовочную трансформацию химических элементов (Bergkvist, 1987; Derome, Nieminen, 1998; Biester et al., 2012). Однако необходимо учитывать, что величина изменчивости данного биомаркера может быть обусловлена не только темпами потери углерода, но также увеличением концентрации азота в анаэробных слоях торфяных залежей и сильно зависит от состава растений-торфообразователей (Muller et al., 2008; Biester et al., 2012). Судя по величине отношения C/N, процессы разложения наиболее активно протекают в торфяной залежи болота Бакчарское, чем Кинзяровское (рис. 3). Наиболее высокие значения C/N на болоте Центральное указывают на низкую степень процессов разложения торфа.

#### *Содержание и распределение химических элементов в торфяных залежах*

Полученные результаты по содержанию химических элементов в торфяных залежах представлены в табл. 2. Поскольку исследуемые залежи

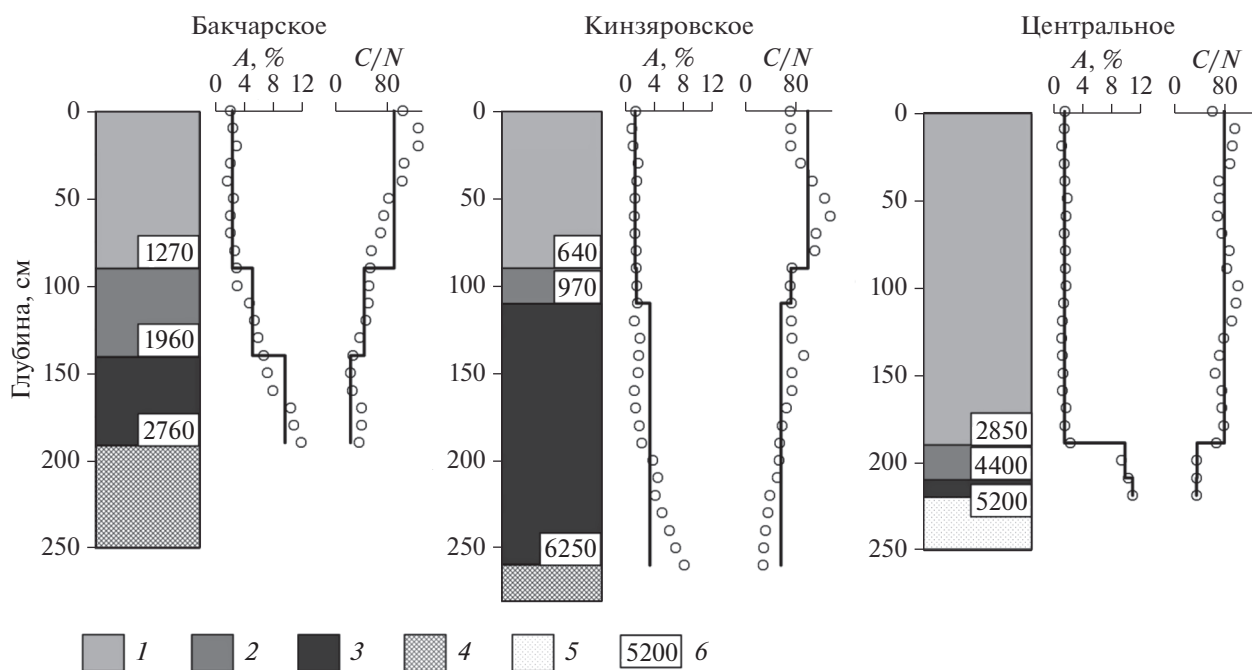


Рис. 3. Схема строения и характеристика торфяных залежей исследуемых болот южно-таежной подзоны Западной Сибири 1 – верховой торф; 2 – переходный торф; 3 – низинный торф; 4 – подстилающие породы, представленные суглинками и глинами; 5 – подстилающие породы, представленные песками и супесями; 6 – 5200 – калиброванный возраст торфяного слоя.  $A, \%$  – зольность торфяных слоев.

включают слои низинного, переходного и верхового торфов разной мощности, для более корректного сравнения торфяных залежей между собой расчет средней величины концентрации элементов и других статистических характеристик проведен для каждого типа торфа отдельно. Для торфяной залежи болота Центральное практически вся совокупность данных по содержанию химических элементов приведена для верховых торфов. Переходный и низинный типы торфа представлены незначительным количеством проб (1 и 2 образца соответственно), что затруднило статистическую обработку полученных результатов для этих торфов. Однако, судя по приведенным данным, очевидно, что низинный торф содержит значительно более высокие концентрации химических элементов, по сравнению с торфом верхового и переходного типа.

Для функции распределения значений концентрации большинства рассматриваемых химических элементов в торфяных залежах характерна асимметрия, свидетельствующая о том, что максимальное количество наблюдаемых концентраций не соответствует значению среднего арифметического. Следовательно, распределение элементов не подчиняется закону нормального распределения, поэтому наряду с традиционной оценкой средней величины концентрации элемента, нами рассчитаны и медианные значения (табл. 2).

Результаты статистической обработки данных (с применением теста Манна-Уитни) свидетель-

ствуют, что низинные и переходные торфа Бакчарского и Кинязровского болот характеризуются близкими концентрациями Ti, Ba, Cu, Ni, Cr, Pb и Cd и статистически значимо ( $p < 0.05$ ) отличаются по Ca, Fe, Sr, Mn и Co, концентрации которых выше в торфяной залежи болота Бакчарское. Верховые торфа всех трех исследуемых болот близки по концентрации большинства химических элементов – Fe, Ca, Ti, Co, Pb, Cd, Cr, Ni. Можно отметить более высокие концентрации Mn и Fe ( $p < 0.05$ ) в верховых торфах болота Бакчарское, по сравнению с торфяными залежами болот Кинязровское и Центральное. Верховые торфа болота Кинязровское характеризуются самым низким содержанием Ba ( $p < 0.05$ ), а болота Центральное – Mn ( $p < 0.05$ ).

Выделено несколько типов распределения элементов внутри профиля торфяных залежей (рис. 4). Причем, одни элементы (Ca, Fe, Cu) в разных торфяных залежах проявляют разный характер распределения, другие (Ti, Ba, Sr, Cu, Ni, Co, Cr, Cd, Mn, Pb), напротив, всегда характеризуются схожей картиной распределения. Для торфяных залежей болот Бакчарское и Кинязровское характерен резко дифференцированный тип распределения элементов, который выражается в значительном увеличении их концентрации в нижнем слое сложенном низинными торфами (с глубины 150 см и ниже – на болоте Бакчарское и с глубины 190 см – на болоте Кинязровское). В этой части профиля средняя концентрация эле-

**Таблица 2.** Статистические характеристики химических элементов в торфяных залежах олиготрофных болот южно-таежной подзоны Западной Сибири

Элемент	Болото Бакcharское			Болото Кинзяровское			Болото Центральное		
	Верховой торф (n = 10)			Верховой торф (n = 9)			Верховой торф (n = 20)		
	X(n) ± StDev	Me	V, %	X(n) ± StDev	Me	V, %	X(n) ± StDev	Me	V, %
Ca	970 ± 610	1164	63	945 ± 245	1014	26	956 ± 212	992	20
Fe	956 ± 391	926	41	503 ± 177	580	35	540 ± 48.12	574	39
Ti	44.44 ± 10.14	44.22	23	46.39 ± 24.55	43.17	53	62.47 ± 29.25	51.58	47
Sr	10.24 ± 4.11	9.39	40	5.72 ± 1.80	5.40	31	5.77 ± 1.85	6.06	32
Ba	13.31 ± 4.29	15.80	32	8.03 ± 1.79	7.80	22	15.31 ± 6.41	15.81	42
Mn	48.87 ± 41.93	36.26	86	40.45 ± 27.68	28.16	68	23.30 ± 42.51	8.76	182
Cu	0.43 ± 0.29	0.40	69	1.60 ± 0.64	1.61	40	1.47 ± 0.53	1.39	36
Ni	0.31 ± 0.08	0.29	23	0.64 ± 0.29	0.65	45	0.70 ± 0.36	0.65	50
Co	0.73 ± 0.17	0.68	23	0.16 ± 0.03	0.17	19	0.16 ± 0.06	0.18	30
Cr	1.09 ± 0.65	1.03	60	1.51 ± 0.38	1.55	25	0.93 ± 0.40	0.85	43
Pb	1.13 ± 1.63	0.43	144	1.11 ± 1.81	0.54	163	0.96 ± 1.43	0.33	148
Cd	0.09 ± 0.02	0.10	23	0.13 ± 0.05	0.15	38	0.08 ± 0.03	0.08	30
Переходный торф (n = 5)			Переходный торф (n = 4)			Переходный торф (n = 2)			
Ca	2131 ± 1560	1386	73	976 ± 271	897	29	276 ± 86	276	31
Fe	2252 ± 1069	1655	47	614 ± 165	620	27	412 ± 299	412	102
Ti	74.16 ± 27.15	71.42	36	32.52 ± 11.29	35.80	34	197.64 ± 61.03	197.64	31
Sr	23.81 ± 3.43	22.76	14	4.97 ± 1.40	4.96	28	26.31 ± 8.19	26.31	31
Ba	24.49 ± 7.38	28.00	30	6.91 ± 2.83	7.10	41	62.50 ± 17.68	62.50	28
Mn	22.39 ± 5.94	21.38	26	13.43 ± 11.1	9.50	85	2.62 ± 1.52	2.62	58
Cu	0.33 ± 0.14	0.33	40	1.33 ± 0.55	1.11	41	0.92 ± 0.29	0.92	32
Ni	0.55 ± 0.11	0.60	20	0.70 ± 0.24	0.73	33	3.16 ± 0.98	3.16	31
Co	1.15 ± 0.53	1.01	46	0.09 ± 0.07	0.08	78	0.42 ± 0.11	0.42	24
Cr	0.22 ± 0.12	0.27	54	1.14 ± 0.45	1.05	39	2.86 ± 2.31	2.86	81
Pb	0.28 ± 0.09	0.32	29	0.48 ± 0.17	0.52	34	0.50 ± 0.02	0.50	4
Cd	0.13 ± 0.02	0.13	15	0.15 ± 0.03	0.15	20	0.87 ± 0.36	0.87	41
Низинный торф (n = 5)			Низинный торф (n = 14)			Низинный торф (n = 1)			
Ca	10250 ± 5314	10602	52	2866 ± 1640	2370	57	1092	—	—
Fe	9877 ± 5712	10431	58	1757 ± 1451	1255	83	910	—	—
Ti	340.47 ± 213	413.82	63	306.15 ± 90.78	346.36	85	327.60	—	—
Sr	73.67 ± 21.37	67.51	28	24.62 ± 21.52	9.06	88	60.06	—	—
Ba	106.40 ± 52.48	84.00	49	35.49 ± 26.64	10.51	75	136.5	—	—
Mn	72.91 ± 52.88	97.73	73	24.88 ± 13.75	13.28	55	9.10	—	—
Cu	4.26 ± 2.49	5.56	58	5.12 ± 4.66	1.33	91	1.46	—	—
Ni	2.81 ± 1.58	2.74	56	3.18 ± 3.22	0.84	101	4.37	—	—
Co	5.14 ± 1.90	5.64	37	0.78 ± 0.77	0.23	98	2.37	—	—
Cr	3.22 ± 2.18	3.25	68	2.89 ± 1.70	1.55	59	5.10	—	—
Pb	1.79 ± 1.38	1.75	77	0.89 ± 0.61	1.09	69	1.27	—	—
Cd	0.36 ± 0.14	0.25	18	0.23 ± 0.14	0.12	41	1.27	—	—
Подстилающие породы (n = 4)			Подстилающие породы (n = 4)			Подстилающие породы (n = 3)			
Ca	35150 ± 2920	35660	9	29590 ± 5056	28529	17	11549 ± 3278	11549	28
Fe	45773 ± 7107	44470	16	26200 ± 3775	26200	14	1900 ± 558	1933	
Ti	2321 ± 337	2250	15	2271 ± 183	2271	8	2279 ± 484	2279	21
Sr	406 ± 59	406	15	278 ± 36	285	13	262 ± 38.5	262	15
Ba	355 ± 72	360	20	290 ± 21	299	7	871 ± 92	871	11
Mn	897 ± 104	913	12	584 ± 55	612	9	624 ± 14	623	2
Cu	16.5 ± 2.5	16.0	15	83 ± 10.3	80	12	7.9 ± 1.9	7.9	24
Ni	39.3 ± 8.0	36.9	20	47.4 ± 2.2	47.4	5	17.1 ± 9.1	12.0	53
Co	18.8 ± 4.2	19.1	23	9.8 ± 1.9	9.8	19	13.1 ± 2.3	13.2	17
Cr	30.5 ± 22.5	23.0	74	38.1 ± 20.6	35.1	54	22.5 ± 2.4	14.8	16
Pb	17.8 ± 1.9	18.4	11	18.1 ± 3.8	18.1	21	14.8 ± 2.4	14.8	16
Cd	3.3 ± 1.4	3.3	41	5.2 ± 0.4	5.2	8	6.5 ± 0.8	6.5	12

Примечание. (X — среднее содержание элемента, мг/кг, StDev. — стандартное отклонение, Me — медиана, V — коэффициент вариации); “—” — статистические расчеты не проводились.

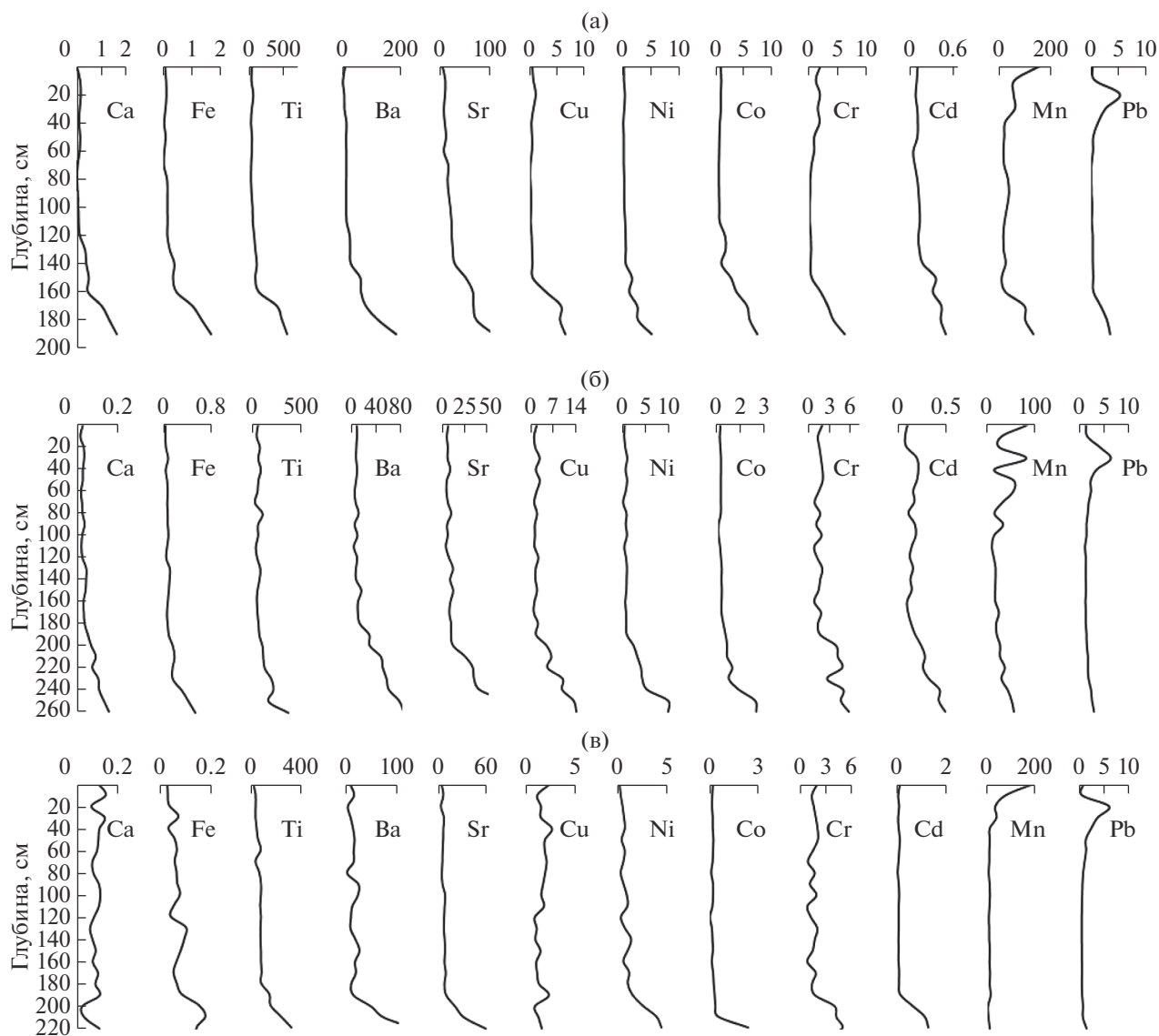


Рис. 4. Распределение химических элементов (мг/кг) в сухом веществе торфа по глубине торфяных залежей болот “Бакcharское” (а), “Кинзяровское” (б) и “Центральное” (в). Содержание Ca и Fe дано в %.

ментов выше (в 2 и более раз) по сравнению с вышележащими слоями торфа (рис. 4а, 4б). Распределение Mn и Pb в обеих торфяных залежах характеризуется резким увеличением концентраций в верхнем слое 0–50 см. При этом в торфяной залежи болота Бакcharское максимум концентрации Pb отмечен в слое 10–20 см, а Mn – в поверхностном слое 0–10 см. В торфяной залежи болота Кинзяровское на фоне общего увеличения концентрации Mn в верхней метровой толще, отмечены резкие его колебания – чередование пиков максимальных и минимальных концентраций. Пик максимальной концентрации Pb приходится на глубину 30–40 см, после чего стабильно уменьшается к придонным слоям.

В торфяной залежи болота Центральное выявлено несколько типов распределения (рис. 4в).

Резко дифференцированный тип характерен для Mn, Pb, их концентрации максимальны в поверхностных слоях и в слое на глубине 40–50 см, ниже по профилю их концентрации резко снижаются и практически не изменяются на протяжении всего вертикального профиля. Титан, Sr, Co, и Cd также характеризуются резко дифференцированным типом распределения, но с отчетливо выраженным повышением концентраций в придонных слоях. Слабо дифференцированы по профилю Ca, Fe, Cu. Для них характерно незначительное варьирование концентраций.

#### *Ассоциации химических элементов*

Для определения групп элементов (геохимических ассоциаций), связанных между собой схоже-



**Таблица 3.** Результаты факторного анализа распределения химических элементов по глубине торфяных залежей

Переменные	Главные факторы									
	1 (76.81%)	2 (14.52%)	3 (3.77%)	1 (77.50%)	2 (13.58%)	3 (4.51%)	1 (58.25%)	2 (13.47%)	3 (10.61%)	4 (6.67%)
	Болото “Бакчарское”			Болото “Кинзяровское”			Болото “Центральное”			
Ca	<b>0.99</b>	–	–	<b>0.99</b>	–	–	0.33	<b>0.83</b>	–	–
Fe	<b>0.99</b>	–	–	<b>0.96</b>	–0.13	–0.20	–	<b>0.70</b>	<b>–0.66</b>	–
Ti	<b>0.99</b>	–	–	<b>0.96</b>	–	–	<b>0.97</b>	–	–0.13	–
Sr	<b>0.93</b>	0.31	–	<b>0.99</b>	–	–	<b>0.96</b>	0.12	–	–
Ba	<b>0.97</b>	–	–	<b>0.98</b>	–	–0.13	<b>0.95</b>	0.14	–	–
Mn	0.43	<b>–0.60</b>	–	–0.24	<b>–0.85</b>	0.29	–0.23	0.20	<b>0.77</b>	–
Cu	<b>0.98</b>	–	–	<b>0.94</b>	–	0.10	–0.10	<b>0.74</b>	0.30	–0.28
Ni	<b>0.98</b>	–	–	<b>0.96</b>	–	0.15	<b>0.98</b>	–	–	–
Co	<b>0.97</b>	–	–	<b>0.98</b>	–	–	<b>0.75</b>	0.38	0.13	–0.23
Cr	<b>0.96</b>	–0.20	–	<b>0.94</b>	–0.17	–0.24	<b>0.92</b>	0.20	–	0.11
Pb	0.41	<b>–0.65</b>	<b>0.53</b>	–0.39	<b>–0.73</b>	<b>0.54</b>	–0.13	–	0.30	<b>0.85</b>
Cd	<b>0.91</b>	–0.17	–	<b>0.96</b>	–0.17	–0.17	<b>0.97</b>	–	0.15	–
A	<b>0.97</b>	0.16	–	<b>0.97</b>	–0.10	–0.17	<b>0.97</b>	–	0.13	–
C/N	–0.41	<b>–0.87</b>	–	–0.47	<b>–0.63</b>	–0.23	<b>–0.81</b>	–	–0.25	0.11
% объясненной дисперсии	95.10			95.60			89.00			

Примечание. Полужирным шрифтом отмечены ведущие компоненты для каждой переменной; прочерком обозначены нагрузки, не являющиеся статистически значимыми.

стью поведения в профиле торфяных залежей, и выявления некоторых гипотетических (скрытых) факторов, определяющих корреляцию между наблюдаемыми переменными, проведен факторный анализ методом главных компонент (табл. 3). Отметим, что выделяемые ассоциации иногда перекрываются, что скорее относится к преимуществам данного метода, поскольку распределение и содержание элементов может определяться множеством факторов и процессов.

Согласно проведенному факторному анализу торфяные залежи болот Бакчарское и Кинзяровское характеризуются идентичным составом выделенных ассоциаций и количеством факторов, объясняющих 95.10 и 95.60% общей дисперсии, соответственно. Для фактора 1, вносящего наибольший вклад в общую дисперсию, характерна геохимическая ассоциация (Ca–Fe–Ti–Ni–Cu–Co–Cr–Ba–Cd–Sr), в которую вошло большинство исследуемых элементов. Все элементы данной ассоциации коррелируют между собой и с зольностью ( $r$  изменяется от 0.70 до 0.95 при  $p = 0.00$ ). Кроме того, все элементы ассоциации объединены схожей картиной профильного распределения (высокие значения их концентраций приурочены к нижней части залежи, сложенной низинным и переходным торфом, а низкие – к верхней части, сложенной верховым торфом).

Фактор 2 в обеих торфяных залежах характеризуется высокой отрицательной нагрузкой на 3 компонента (табл. 3). В случае с торфяной залежью болота Бакчарское данный фактор характеризуется максимальной нагрузкой на отношение

C/N, меньшей – на Pb и Mn. Распределение Mn и Pb в профиле торфяной залежи практически синхронно изменяется с величиной отношения C/N в верхней части профиля, что подкрепляется и наличием корреляционных связей между этими параметрами ( $r_{Mn-C/N} = 0.69$ , при  $p = 0.00$  и  $r_{Pb-C/N} = 0.60$ , при  $p = 0.01$ ); между Mn и Pb также есть значимая корреляция ( $r_{Mn-Pb} = 0.55$  при  $p = 0.01$ ). В случае с торфяной залежью болота Кинзяровское фактор 2 отражает нагрузку на те же компоненты, только в большей степени нагрузка приходится на Mn и Pb и в меньшей на C/N. Корреляционные связи металлов с величиной отношения C/N не обнаружены, как это было отмечено для торфяной залежи болота Бакчарское. Выявлена некоторая схожесть совместного поведения Mn и Pb в торфяном профиле – это подтверждается значимой положительной корреляцией ( $r_{Mn-Pb} = 0.58$ , при  $p = 0.00$ ). Для фактора 3 проявилась нагрузка только на Pb.

Совершенно иные результаты факторного анализа получены для торфяной залежи болота Центральное (табл. 3). Для этой залежи выделено 4 основных фактора, объясняющих в сумме 89.0% общей дисперсии. Большинство исследованных показателей значимо определяется первым фактором (вклад от общей дисперсии 58.25%). Для него характерна ассоциация элементов Ni–Ti–Cd–Sr–Ba–Cr. Вместе с тем, отмечена высокая отрицательная нагрузка отношения C/N на данный фактор. Вторым фактор объясняет 13.5% дисперсии и отражает высокую нагрузку на ассоциацию Ca–Fe–Cu. Влияние третьего фактора опи-

сывается 10.6% дисперсии. Выявлена высокая нагрузка фактора на Mn. Фактор 4 ассоциируется со Pb, как и в случае с торфяными залежами болот Бакчарское и Кинзяровское.

### ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Все три исследованных болота внешне выглядят одинаково, их поверхность в современных условиях имеет сходный растительный покров. Вместе с тем, комплекс полученных нами данных свидетельствует, что торфяные залежи имеют разный возраст, мощность торфяных отложений и характеризуются различными темпами скорости торфонакопления в одни и те же временные интервалы. Следует подчеркнуть, что исследуемые болота имеют разное геоморфологическое положение в ландшафте – водораздел (болото Бакчарское), вторая надпойменная терраса (болото Кинзяровское) и ложбина древнего стока (болото Центральное) и развиваются на разных по литохимическому составу подстилающих породах.

Торфяные залежи болот Бакчарское и Кинзяровское сформировались в соответствии с олиготрофным типом суходольного заболачивания (автохтонный тип) (Караваева, 1982). Причем развитие мощного слоя низинного торфа на болоте Кинзяровское является следствием приуроченности торфяной залежи к террасному типу залегания. В системе сопряженных геохимических ландшафтов такие водораздельные массивы характеризуются меньшей степенью геохимической автономности по сравнению с водораздельными, что обуславливает стабильное минеральное питание в течение длительного времени, способствующее развитию торфяной залежи с более мощным слоем торфа низинного типа. Эта особенность отмечена и для ряда других болот Западной Сибири, имеющих террасный тип залегания (Архипов, Бернатонис, 2013). Структура торфяной залежи болота Центральное несет в себе характерные черты, указывающие на аллохтонный тип заболачивания (почвенно-грунтовое заболачивание на легких породах) в результате длительного поверхностного затопления (Караваева, 1982). Особенности литологического состава подстилающих пород, которые представлены песчаными разностями, обеспечивали хороший дренаж для поступающих на поверхность атмосферных осадков и обусловили чрезвычайно низкую скорость торфонакопления на начальном этапе развития болота. По мере дальнейшего увлажнения и уменьшения дренажа торфонакопление ускорилось. В результате сформировалась залежь, сложенная преимущественно верховым торфом, с очень тонкими слоями низинного и переходного торфов в придонной части залежи.

Торфяные залежи болот Бакчарское и Кинзяровское сформировались на тяжелых по механиче-

скому составу породах – карбонатных суглинках и глинах, что обусловило их развитие в условиях более богатого водно-минерального питания и формирование выраженных слоев низинного, переходного и верхового торфа. В отличие от них, формирование торфяной залежи болота Центральное происходило на обедненных по элементному составу песчаных отложениях, что способствовало развитию олиготрофной болотной растительности, не требовательной к богатому минеральному питанию, и образованию залежи, сложенной на 86% верховым торфом.

Отмеченные выше особенности формирования торфяных залежей (геоморфологическое положение, литохимический состав подстилающих пород, водно-минеральное питание), обусловившие в каждом конкретном случае их стратиграфический облик, в полной мере отразились и на вещественном составе торфяного профиля. Так, полученные данные по величине зольности торфов довольно четко отражают строение и особенности водно-минерального питания торфяных залежей, закономерно уменьшаясь от низинных торфов к верховым. Вместе с тем, для каждой торфяной залежи характерны свои пределы изменчивости величины этого показателя. Например, зольность низинных торфов болота Кинзяровское меньше, чем низинных торфов болота Бакчарское. Мы полагаем, что основной причиной является большая мощность слоя низинного торфа на болоте Кинзяровское, что ослабило влияние подстилающих пород на питание торфяной залежи в процессе ее формирования и соответствующим образом отразилось на зольности торфов. Зольность придонных слоев на контакте с подстилающим субстратом в залежи болота Центральное довольно высокая и сопоставима с зольностью низинного торфа на болоте Бакчарское. Однако зольность верхового торфа, из которого практически полностью сложена торфяная залежь болота Центральное, имеет низкие значения. Это является подтверждением преимущественного атмосферного питания болота и наименьшей степени подпитки со стороны минерального дна и прилегающих склонов.

В отличие от большинства геологических объектов, в составе которых преобладает минеральная компонента, при изучении торфов на первый план выступает органическая масса. Величина отношения C/N в торфяных залежах болот Бакчарское и Кинзяровское характеризуется общим трендом: для верхних слоев отмечены более высокие значения C/N, что соответствует омбротрофным условиям и низкому содержанию неорганического вещества в торфе. При этом, в торфяной залежи болота Бакчарское самые высокие значения отношения C/N приурочены к верхнему слою 0–40 см, а на болоте Кинзяровское к слою – 40–80 см. При движении вглубь торфяных залежей значения отношения C/N снижаются, свиде-

тельствую об увеличении степени разложения торфа. Такой характер изменения отношения является довольно типичным для большинства болот олиготрофного типа и объясняется быстрым бициклированием азота и медленными потерями углерода во время разложения торфа в бескислородных условиях (Biestler et al., 2012). Торфяная залежь болота Центральное характеризуется более высокими значениями величины C/N и меньшей их изменчивостью в профиле; ярких пиков, свидетельствующих об интенсивности увеличения или уменьшения процессов разложения в торфяной залежи, не отмечается, за исключением придонных слоев, в которых происходит резкое уменьшение значения C/N. При этом содержание азота по профилю изменяется слабо, увеличиваясь лишь в придонном слое, тогда как углерод варьирует с тенденцией увеличения с глубиной.

В настоящее время все три торфяные залежи получают питание преимущественно с атмосферными осадками. Это прослеживается в близкой концентрации большинства химических элементов в верхних слоях торфяных залежей (табл. 2). Более значимые различия в концентрации химических элементов проявляются при движении вглубь по профилю к переходным торфам и далее — к низинным (табл. 2). В этом плане особенно показательны элементы Ca, Mn, Fe, Sr, Co, концентрации которых в переходных торфах болота Бакчарское в 2–4 раза выше, чем в аналогичных торфах болота Кинзяровское, и почти в 6–9 раз — болота Центральное. Различия между торфяными залежами становятся еще более контрастными при сравнении низинных торфов, где превышение концентрации выше отмеченных элементов становится еще более значительным (от 3 до 11 раз) (табл. 2).

Выявленные нами различия в содержании химических элементов в торфяных залежах согласуются с особенностями состава подстилающих пород и минерализация природных вод, питающих торфяные болота, которые специфичны для левобережья и правобережья Оби (Савичев, 2010; Евсеева и др., 2012). В частности, водно-минеральное питание болота Бакчарское определяется тяжелыми по механическому составу породами — суглинками и глинами повышенной карбонатности (содержание кальция в породах достигает 13% (Нейштадт, 1972)). Специфичность подстилающих пород на левобережье р. Обь предопределила геохимию болотных и подземных вод, обусловив увеличение в них суммарного содержания растворенных солей, и, как следствие, повышенную минерализацию (Савичев, Каменева, 2010). Такие природные условия создают определенный геохимический фон, благоприятный для обогащения болотных экосистем химическими элементами (Архипов и др., 1988, 2000), включающих исследованные болота Бакчарское и Кинзяровское. Так, проведенный нами элементный анализ показал, что содержание Ca в подстилаю-

щих грунтах болота Бакчарское колеблется от 3.0 до 3.9%, а болота Кинзяровское от 2.0 до 3.6%, в отличие от подстилающих грунтов болота Центральное, где концентрация Ca гораздо ниже — от 0.8 до 1.6% (табл. 2).

К особенностям торфяной залежи болота Бакчарское можно отнести более высокое содержание Fe в торфах, которое определяется, вероятнее всего, его повсеместным распространением в подземных, в том числе болотных, водах, причины сосредоточения которого в них до настоящего времени до конца не ясны. С одной стороны, его высокое содержание в болотных экосистемах может быть обусловлено влиянием крупнейшего в России Бакчарского железорудного месторождения (Архипов и др., 1988) (в руде содержится от 30 до 46% железа), пространственная приуроченность которого территориально совпадает с расположением этого болота. В свете развития другой концепции, источником Fe в болотных водах исследуемого региона являются алюмосиликатные породы. Железо и другие химические элементы при переходе в растворенное состояние попадают в глеевую околонейтральную обстановку с повышенным содержанием органического вещества и благоприятную для их накопления (Иванова и др., 2014). Согласно еще одной теории (Savichev et al., 2020) накопление Fe и ряда других элементов внутри торфяного профиля болот данного района обусловлено существованием двух сорбционных геохимических барьеров: верхнего — окислительно-восстановительного, сульфидного и нижнего — более сложного щелочного, механического. При этом вероятность обнаружения высоких концентраций различных элементов в большей мере характерна для нижнего барьера, охватывающего зону нижней части торфяного профиля и верхнюю часть подстилающего грунта.

Болото Центральное расположено на правобережье р. Обь, где в подстилающих грунтах преобладают отложения пайдугинской свиты и аллювиальные отложения террас, представленные песками и песками с гравием, имеющих более бедный химический состав, по сравнению с суглинками и глинами. В частности, торфяная залежь болота Центральное сформирована под влиянием литологического состава вмещающих рыхлых пород, среди которых преобладают песчаные разности, что соответствующим образом отразилось на водно-минеральном питании торфяной залежи, ее строении и на содержании и распределении химических элементов по глубине торфяного профиля.

Для выявления закономерностей распределения элементов внутри торфяного профиля и выяснения вопросов генезиса залежей болот проведен анализ геохимических данных при помощи факторного анализа.

Для торфяных залежей болот Бакчарское и Кинзяровское факторный анализ показал, что

распределение большинства исследуемых элементов (Ca, Fe, Ti, Ni, Cu, Co, Cr, Ba, Cd, Sr) зависит от фактора 1 (табл. 3). Первый фактор обусловлен высокой корреляционной связью между элементами. Такое факторное решение на наш взгляд может объясняться особенностями подстилающих пород и, связанным с ними химическим составом вод, которые были основными поставщиками элементов для формирующихся торфяных отложений. Иными словами, данный фактор может отражать особенности водно-минерального питания торфяных залежей. Обе торфяные залежи на начальном этапе формировались в условиях богатого минерального питания. По мере роста торфяной залежи вверх связь с подстилающими породами постепенно ослабевала, и происходило постепенное снижение концентрации химических элементов в торфянике. Этим объясняется обнаруженный тренд распределения этих элементов внутри профиля торфяных залежей (рис. 3). С другой стороны, такое распределение химических элементов по глубине торфяной залежи может быть вызвано и влиянием болотной микрофлоры, которая, согласно исследованиям О.Г. Савичева с соавт. (2018), является важным фактором распределения химических элементов в различных внутриболотных экосистемах восточной части Васюганского болота. Вероятность накопления в торфах малорастворимых соединений кальция, железа и ряда редкоземельных элементов исследователи связывают с усилением развития болотной микрофлоры в анаэробных условиях, приводящее к смещению карбонатного равновесия и выпадению малорастворимых соединений кальция. Однако, следует обратить внимание, что данное рассуждение может быть применено лишь для торфяной залежи болота Бакчарское.

Фактор 2 в обеих торфяных залежах характеризуется высокой отрицательной нагрузкой на отношение C/N, Pb и Mn. В случае с торфяной залежью болота Бакчарское максимальная нагрузка фактора приходится на отношение C/N, что может быть интерпретировано как действие диатомеоза, вызванное разложением органики в анаэробных условиях, что также было продемонстрировано и в других исследованиях (Bergkvist, 1987; Derome, Nieminen, 1998; Biester et al., 2012). С этим процессом связано поведение Mn и Pb. Распределение этих элементов практически синхронно изменяется с величиной отношения C/N в верхней части профиля, что подкрепляется и наличием корреляционных связей между этими параметрами ( $r_{Mn-C/N} = 0.69$  при  $p < 0.001$  и  $r_{Pb-C/N} = 0.60$  при  $p = 0.01$ ). Это указывает на то, что распределение Mn и Pb в торфяной залежи болота Бакчарское определяется степенью деструкции органического вещества, и перераспределение элементов в торфяной залежи может зависеть от образования металлоорганических комплексов с

органическим веществом, как это отмечалось ранее для других болот Земного шара (Biester et al., 2012; Vasilevich, 2018).

В случае с торфяной залежью болота Кинзяровское фактор 2 отражает нагрузку на те же компоненты, что и в торфяной залежи болота Бакчарское, только нагрузка в большей степени приходится на Mn и Pb и в меньшей – на C/N. С одной стороны, распределение всех трех компонентов отражает общий убывающий тренд значений с глубиной. С другой стороны, пики концентраций Mn и Pb и отношения C/N находятся на разных глубинах и не совпадают друг с другом, что говорит о том, что за поведение металлов отвечают процессы, не связанные с разложением органического вещества. Не обнаружены и корреляционные связи металлов с величиной отношения C/N, как это было отмечено для болота Бакчарское. Скорее всего, данный фактор указывает на роль окислительно-восстановительных процессов, которые определяют поведение элементов в профиле, их накопление происходит в верхних слоях торфяной залежи, где поддерживаются преимущественно окислительные условия. Поэтому Mn, как элемент наиболее чувствительный к окислительно-восстановительным условиям, характеризуется максимальной нагрузкой на данный фактор. Оксиды Mn могут играть роль естественных сорбентов в кислой среде для ряда тяжелых металлов, в том числе и для Pb (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989), что, вероятно, проявилось и в нашем исследовании. Схожесть совместного поведения этих элементов в торфяном профиле подкрепляется положительной корреляцией ( $r_{Mn-Pb} = 0.58$  при  $p < 0.001$ ).

Фактор 3 в торфяных залежах болот Бакчарское и Кинзяровское отражает нагрузку только на Pb. Свинец – халькофильный элемент, относится к числу техногенных, его накопление в верхней части торфяных залежей может осуществляться за счет атмосферного переноса, как это было продемонстрировано ранее на примере болот разных регионов Земного шара (Shotyk et al., 1997, 1998; Weiss et al., 2002; Ukonmaanaho et al., 2004; Ferrat et al., 2012 и др.). Можно предположить, что такое обособленное положение в ряду всех исследуемых элементов может говорить о том, что в настоящее время поступление Pb в торфяные залежи контролируется совершенно другими процессами и источниками, возможно, неприродного происхождения.

Результаты факторного анализа для торфяной залежи болота Центральное раскрывают несколько другую картину распределения химических элементов в торфе. В отношении фактора 1 проявились положительные высокие нагрузки на ассоциацию элементов Ni–Ti–Cd–Sr–Ba–Cr, отмечена высокая отрицательная нагрузка отношения C/N на данный фактор. Следует отметить,

что элементы данной ассоциации не коррелируют между собой, что говорит о том, что источники этих элементов разные. Несмотря на их различное геохимическое поведение, их концентрации соответствуют изменению отношения C/N. По мнению Biester et al. (2012) соответствие изменений концентраций элементов изменению отношения C/N в торфяном профиле может указывать на осаждение элементов с атмосферной пылью и это осаждение непостоянно во времени. Например, в более сухие периоды, когда разложение торфа и потери массы высокие, осаждение атмосферной пыли увеличивалось, и наоборот. Принимая во внимание тот факт, что торфяная залежь болота Центральное сформировалась в условиях преимущественно атмосферного питания, данная интерпретация вполне убедительно объясняет обнаруженную нами связь между выявленной ассоциацией элементов и отношением C/N.

Второй фактор отражает высокую нагрузку на ассоциацию Ca—Cu—Fe. Данная ассоциация может индцировать редокс-независимые процессы растворения и мобилизации Ca и Cu, в том числе и за счет поглощения этих элементов растениями (Лукашев и др., 1971; Muller et al., 2008; Biester et al., 2012). Интересным является факт отсутствия корреляций между зольностью торфов и содержанием Ca и Fe, несмотря на то, что эти химические элементы принято относить к основным золообразующим. По нашему мнению, поступление этих элементов в залежь происходило биогенным путем в составе растений-торфообразователей.

Влияние третьего фактора указывает, скорее всего, на противоположное окислительно-восстановительное поведение Fe и Mn, так как их нагрузки на фактор имеют противоположные знаки. Высокая нагрузка фактора на Mn, в основном, объясняет его повышенное содержание в поверхностном слое залежи, т.е. в окислительных условиях. В условиях общей обедненности марганцем подстилающих пород Mn активно мигрирует в восстановительных условиях и обедняет торфяную залежь, накапливаясь в поверхностных слоях (Steinmann and Shotyky, 1997; Gallego et al., 2013), чего не наблюдается для Fe. Как и железо, марганец является важнейшим элементом в геохимических процессах, поскольку его окиси и гидроокиси являются активными сорбентами многих микроэлементов.

Для четвертого фактора выявлена высокая нагрузка только на Pb, подобно двум выше рассмотренным торфяным залежам.

Анализируя полученное факторное решение, а также учитывая выявленные нами особенности формирования торфяных залежей, можно отметить следующие основные моменты. Торфяная залежь болота Бакчарское характеризуется большим содержанием химических элементов (осо-

бенно по основным золообразующим — Ca, Fe, а также Sr, Ba, Co, Cr, Mn), чем торфяные залежи болот Кинзяровское и Центральное. Однако это отличие между ними предопределяется специфической выше отмеченных региональных особенностей территории, к которой приурочено данное болото.

Несмотря на то, что торфяные залежи болот Бакчарское и Кинзяровское отличаются по уровням концентрации химических элементов, их геохимические портреты имеют больше сходств, чем отличий. Стратиграфический облик обеих торфяных залежей характеризуется трехслойным строением, разница состоит лишь в наличии более мощного слоя низинного торфа в торфяной залежи болота Кинзяровское, что обусловлено его геоморфологическим положением в ландшафте. Кроме того, факторный анализ выявил идентичный состав геохимических ассоциаций и количество факторов, объясняющих сходный процент общей дисперсии. По сути, рассматриваемые элементы в этих торфяных залежах можно разделить на 2 группы. Распределение элементов Ca, Fe, Ti, Ni, Cu, Co, Cr, Ba, Cd, Sr в обеих торфяных залежах отражает, по нашему мнению, общую закономерность эндогенного болотообразовательного процесса на тяжелых подстилающих породах — глинах и суглинках, который контролируется водно-минеральным питанием и сопровождается постепенной олиготрофизацией болота по мере его развития. Однако распределение Mn и Pb резко контрастирует с поведением выше рассмотренных элементов и обусловлено, с одной стороны, чувствительностью Mn к окислительно-восстановительным процессам, с другой, диагенетическим преобразованием в результате деструкции органического вещества.

В совершенно иной геохимической обстановке происходило торфонакопление болота Центральное. В результате скудного минерального питания торфяная залежь обладает низкой зольностью, а содержание химических элементов в торфах невысоко. Как следствие этого, в торфяной залежи связи между элементами иные, формируются другие ассоциации. Накопление таких элементов как Ni, Ti, Cd, Sr, Ba, Cr шло параллельно, и за это отвечал один процесс, не связанный с накоплением Ca, Fe и Cu, формирующих отдельную ассоциацию. Последняя является особенностью болота Центрального, в котором на фоне отсутствия дополнительного привноса минеральных компонентов ярко проявился биогенный фактор в накоплении элементов этой ассоциации.

Общей особенностью для всех трех торфяных залежей, независимо от их генезиса, типа строения залежи и геохимических условий, является одна и та же закономерность в поведении свинца. Наблюдается его обособленное положение в ряду всех исследуемых элементов, что способствовало

его выделению в отдельную ассоциацию. Это может говорить о том, что его поступление в торфяные залежи в настоящее время контролируется совершенно другими процессами и источниками, вероятно природного происхождения.

Интересно отметить и гетерогенный характер поведения Fe в исследованных торфяных залежах. В одном случае, он ведет себя как основной золообразующий элемент, активно участвующий в минеральном питании, как это наблюдается на болотах Бакчарское и Кинзяровское. В другом случае, железо проявляет окислительно-восстановительные свойства, за счет чего наблюдаются колебания его концентрации в залежи болота Центральное, а его содержание обусловлено биогенным фактором. Различное геохимическое поведение железа неоднократно отмечалось и в других исследованиях торфяных болот (Лукашев и др., 1971; Steinmann, Shoty, 1997; Weiss et al., 2002; Gallego et al., 2013).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Геохимические портреты торфяных залежей определяются геохимической спецификой района исследований в каждом конкретном случае. Исследуемые торфяные залежи болот, несмотря на их внешнее сходство в растительном покрове, различаются стратиграфическим профилем, имеют разный возраст, сформированы на разных элементах ландшафта и подстилаются различными по составу подстилающими породами. Воздействие этих факторов определило разное строение торфяной залежи исследованных болот (соотношение слоев торфа низинного, переходного и верхового типа), различия в концентрации химических элементов в торфе (на глинистых и суглинистых подстилающих породах, в отличие от песчаных, формируется торф с более высоким содержанием химических элементов), а также оказало дифференцированное влияние на геохимические ассоциации элементов, сформировавшиеся в каждой из залежей.

Факторный анализ позволил выявить в аналитических данных ряд факторов, которые объясняют внутренние, на наш взгляд, объективно существующие закономерности в распределении химических элементов в профиле торфяных залежей. К таким факторам отнесены следующие: эндогенное поступление из подстилающих пород и грунтовых вод (для элементов Ca, Fe, Ti, Ni, Cu, Co, Cr, Ba, Cd, Sr), активность окислительно-восстановительных процессов (Mn, Pb, Fe), редокс-независимые процессы растворения и мобилизации элементов корнями растений (Ca, Cu, Fe), интенсивность разложения торфа (Mn, Pb, отношение C/N), уровень обводненности болота (отношение C/N), экзогенный привнос из атмосферы примесей техногенных веществ в результате человеческой деятельности (Pb).

Результаты нашей работы показали, что учет вышеуказанных факторов необходим для корректной геохимической оценки состояния болотной экосистемы и также при экологическом мониторинге состояния территории в целом. В противном случае, при получении большого разброса значений концентраций элементов есть вероятность или пропустить начавшееся техногенное загрязнение, или, напротив, принять естественный региональный фон за результат техногенного воздействия.

*Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы № АААА-А17-117013050031-8.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арбузов С.И., Архипов В.С., Бернатонис В.К., Бобров В.А., Маслов С.Г., Межибор А.М., Прейс Ю.И., Рихванов Л.П., Судыко А.Ф., Сысо А.И. (2009) Среднее содержание некоторых элементов-примесей в торфах юго-восточной части Западно-Сибирской плиты. *Известия Томского политехнического университета*. **315**(1), 44-48.
- Архипов В.С., Бернатонис В.К. (2013) Распределение кальция и железа в вертикальном профиле торфяных залежей таежной зоны Западной Сибири. *Известия Томского политехнического университета. Гидрогеология*. **323**(1), 173-178.
- Архипов В.С., Бернатонис В.К. (2015) Распределение марганца в торфяных залежах. Томской области *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. **326**(7), 27-35.
- Архипов В.С., Бернатонис В.К., Резчиков В.И. (2000) Распределение Fe, Co и Cr в торфяных залежах центральной части Западной Сибири. *Почвоведение*. **12**, 1439-1447.
- Архипов В.С., Резчиков В.И., Смольянинов С.И., Мышова Т.С. (1988) Микроэлементы в торфе месторождения Обь-Иртышского междуречья. *Химия твердого топлива*. **9**, 25-27.
- Веретенникова Е.Э. (2013) Содержание и распределение химических элементов в торфах южнотаежной подзоны Западной Сибири. *География и природные ресурсы*. **2**, 89-95.
- Лукашев К.И., Ковалев В.А., Жуховицкая А.Л. (1971) Геохимия озерно-болотного литогенеза. Минск: Наука и техника, 353 с.
- ГОСТ 11306-83. Торф. Методы определения зольности (1984). М.: Изд-во стандартов, 6 с.
- Инишева Л.И., Цыбукова Т.Н. (1999) Эколого-геохимическая оценка торфов юго-востока Западно-Сибирской равнины. *География и природные ресурсы*. **1**, 45-51.
- Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. (1989) *Микроэлементы в почвах и растениях*. М.: Мир, 439 с.
- Караваева Н.А. (1982) *Заболачивание и эволюция почв*. М.: Наука, 296 с.
- Кац Н.Я., Кац С.В., Скобеева Н.И. (1977) *Атлас растительных остатков в торфах*. М.: Недра, 376 с.
- Ковалев В.А. (1985) Болотные минералого-геохимические системы. Минск: Наука и техника, 327 с.
- Курына И.В., Веретенникова Е.Э. (2015) Воздействие климатических изменений на развитие грядово-моча-

- жинного болотного комплекса в голоцене. *Известия РАН. Серия Географическая*. **2**, 74-87.
- Лисс О.Л., Абрамова Л.И., Аветов Н.А., Березина Н.А., Инишева Л.И., Курнишкова Т.В., Слук З.А., Толпышева Т.Ю., Шведчикова Н.К. (2001) Болотные системы Западной Сибири и их природное значение (под ред. Куваева В.Б.). Тула: Гриф и КО, 584.
- Московченко Д.В. (2006) Биогеохимические особенности верховых болот Западной Сибири. *География и природные ресурсы*. **1**, 63-70.
- Нейштадт М.И. (1972) *Болота Обь-Иртышского междуречья. Природные условия освоения междуречья Обь-Иртыш (Под ред. Рихтера Г.Д.)*. М.: ИГАН, 322-346.
- Пологова Н.Н., Лапшина Е.Д. (2002) Накопление углерода в торфяных залежах Большого Васюганского болота. *Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития*. (Под ред. Кабанова М.В.). Томск: Изд-во Ин-та оптики атмосферы СО РАН, 174-179.
- Пономарева В.В., Плотникова Т.А. (1975) Методические указания по определению содержания и состава гумуса в почвах (минеральных и торфяных). Л.: ЦМП им. Докучаева ВАСХНИЛ, 106 с.
- Савичев О.Г. (2015) Геохимические показатели болотных вод в таежной зоне Западной Сибири. *Известия РАН. Серия Географическая*. **4**, 47-57.
- Савичев О.Г., Каменева О.А. (2010) Пространственно-временные изменения минерализации подземных вод в бассейне средней Оби. *Разведка и охрана недр*. **11**, 67-70.
- Bergkvist B. (1987) Soil solution chemistry and metal budgets of spruce forest ecosystems in S. Sweden. *Water Air Soil Pollut.* **33**, 131-154.
- Biester N., Hermanns Y.-M., Martinez Cortizas A. (2012) The influence of organic matter decay on the distribution of major and trace elements in ombrotrophic mires – a case study from the Harz. Mountains *Geochim. Cosmochim. Acta*. **84**, 126-136.
- Blaauw M. (2010) Methods and code for 'classical' age-modelling of radiocarbon sequences. *Quant. Geochronology*. **5**, 512-518.
- Gallego J. L. R., Ortiz J. E., Sierra C., Torres T., Llamas J.F. (2013) Multivariate study of trace element distribution in the geological record of Roñanzas Peat Bog (Asturias, N. Spain). Paleoenvironmental evolution and human activities over the last 8000 cal yr BP. *Sci. Total Environ.* **454-455**, 16-29.
- Derome J., Nieminen T.M. (1998) Metal and macronutrient fluxes in heavy-metal polluted Scots pine ecosystems in SW Finland. *Environ. Pollut.* **103**, 219-228.
- Eckstein Y., Savichev O.G., Pasechnik E.Yu. (2015) Two decades of trends in ground water chemical composition in The Great Vasyugan Mire, Western Siberia, Russia. *Environ. Earth Sci.* **73**, 7329-7341.
- Ferrat M., Weiss D.J., Dong S., Large D.J., Spiro B., Sun Y., Gallagher K. (2012) Lead atmospheric deposition rates and isotopic trends in Asian dust during the last 9.5 kyr recorded in an ombrotrophic peat bog on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **82**, 4-22.
- Kuhry P., Vitt D.H. (1996) Fossil carbon/nitrogen ratios as a measure of peat decomposition *Ecology*. **77**, 271-275.
- Mäkilä M., Nieminen T.M., Säävuori H., Loukola-Ruskeeniemi K., Ukonmaanaho L. (2015) Does underlying bedrock affect the geochemistry of drained peatlands? *Geoderma*. **239-240**, 280-292.
- Malmer N., Wallen B. (2004) Input rates, decay losses and accumulation rates of carbon in bogs during the last millennium: internal processes and environmental changes. *Holocene*. **14**, 111-117.
- Mezhbor A., Arbuzov S.I., and Arkhipov V. (2013) Trace elements in peat bogs of Tomsk region (South Siberia, Russia). *Energy Explor. Exploit.* **31**(4), 629-644.
- Mezhbor A.M. Arbuzov S.I., and Rikhvanov L.P., (2009) Accumulation and average contents of trace elements in the high-moor peat of Tomsk region (Western Siberia, Russia). *Energy Explor. Exploit.* **27**(6), 401-410.
- Muller J., Kylander M., Martinez-Cortizas A., Wust R. A.J., Weiss D., Blake K., Coles B., Garcia-Sanchez R. (2008) The use of principle component analyses in characterizing trace and major elemental distribution in a 55 kyr peat deposit in tropical Australia: Implications to paleoclimate. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **72**, 449-463.
- R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. (2012) *R Foundation for Statistical Computing*. Vienna, Austria. URL: <https://www.r-project.org/> (accessed: 01.02.2019)
- Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Buck C.E., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hajdas I., Hatté C., Heaton T.J., Hafliadon H., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser K.F., Kromer B., Manning S.W., Niu M., Reimer R.W., Richards D.A., Scott E. M., Southon J.R., Turney C.S.M., van der Plicht J. (2013) Intcal13 and Marine13 Radiocarbon age calibration curves 0–50,000 years calBP. *Radiocarbon*. **55**(3), 1869-1887.
- Shotyk W., Cheburkin, A.K., Appleby P.G., Fankhauser A., and Kramers, J.D. (1997) Lead in three peat bog profiles, Jura mountains, Switzerland: enrichment factors, isotopic composition, and chronology of atmospheric deposition *Water Air Soil Pollut.* **100**, 297-310.
- Shotyk W., Weiss D., Appleby P.G., Cheburkin A.K., Frei R., Gloor M., Kramers J.D., Reese S., Van der Knaap W.O. (1998) History of atmospheric lead deposition since 12,370 <sup>14</sup>C yr BP from a peat bog, Jura Mountains, Switzerland. *Science*. **281**, 1635-1640.
- Steinmann P. Shotyk W. (1997) Geochemistry, mineralogy, and geochemical mass balance on major elements in two peat bog profiles (Jura Mountains, Switzerland). *Chem. Geology*. **138**, 25-53.
- Stepanova V.A., Pokrovsky O.S., Viers J., Mironycheva-Tokareva N.P., Kosykh N.P., Vishnyakova E.K. (2015) Elemental composition of peat profiles in western Siberia: Effect of the micro-landscape, latitude position and permafrost coverage. *Ap. Geochem.* **53**, 53-70.
- Ukonmaanaho L., Nieminen T.M., Rausch N., Shotyk W. (2004) Heavy metal and arsenic profiles in ombrogenous peat cores from four differently loaded areas in Finland. *Water Air Soil Pollut.* **158**, 277-294.
- Vasilevich R.S. (2018) Major and trace element compositions of hummocky frozen peatlands in the forest-tundras of north-eastern European Russia. *Geochem. Int.* **56**(12), 1158-1172.
- Veretennikova E.E. (2015) Lead in the natural peat cores of ridge-hollow complex in the taiga zone of West Siberia. *Ecol. Eng.* **80**, 100-107.
- Weiss D., Shotyk W., Boyle E.A., Kramers J.D., Appleby P.G., Cheburkin A.K. (2002) Comparative study of the temporal evolution of atmospheric lead deposition in Scotland and eastern Canada using blanket peat bogs. *Sci. Tot. Environ.* **292**(1-2), 7-18.