

## ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ И ПАРАМЕТРЫ ЛАНДШАФТНО-ГЕОХИМИЧЕСКОГО БАРЬЕРА НИЗИННОГО БОЛОТА

© 2021 г. В. В. Сысуев\*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова Географический факультет,  
Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

\*e-mail: v.v.syss@mail.ru

Поступила в редакцию 12.02.2019 г.

После доработки 11.09.2020 г.

Принята к публикации 06.10.2020 г.

Исследовано южно-таежное низинное болото в пределах Осташковской конечно-моренной гряды Валдайской возвышенности на территории Новгородской области. Получены характеристики ландшафтно-геохимического барьера болота, которые необходимо учитывать как при поисках полезных ископаемых, так и при планировании рационального природопользования. Химический состав торфов и дренирующих вод обусловлен сложным пространственно-временным взаимодействием поверхностного и грунтового стока с процессами торфообразования, разложения минеральных примесей и сорбционно-десорбционными особенностями торфов. Для Si, Al, Ti, Na, K – элементов, поступающих преимущественно с поверхностным стоком и накапливающихся благодаря действию механического барьера, в результате выщелачивания минеральных примесей и сорбции торфами характерно близкое к экспоненциальному уменьшение содержания по мере удаления от склонов моренной гряды. Для Ca, Mg, S, Fe и Mn ведущим фактором распределения содержания в низинных торфах является миграция с грунтовыми водами. Под действием фильтрации и сорбции их содержание в торфах отчетливо фиксируют зону разгрузки грунтовых вод. Контрастность исследованного геохимического барьера, рассчитанная как соотношение содержаний компонентов в водах до и после барьера, составляет для концентрирующихся элементов  $K_{Al} \sim 12-10$ ,  $K_{Ca} \sim 8-4$ ,  $K_{Fe} \sim 6-4$ ,  $K_{Mn} \sim 4-3$ ,  $S_S \sim 2-1.5$ ; для слабо концентрирующихся элементов  $K_{Cl, K, Na} \sim 1.5-0.8$ , для не концентрирующихся  $K_{Si} \sim 1-0.3$ . В условиях гумидного климата комплексный геохимический барьер низинного болота в течении голоцена эффективно поглощал химические вещества, мигрирующие как в растворенном, так и во взвешенном состоянии. Причем геохимический барьер недосыщен по всем элементам, что свидетельствует о высоких водоочистных способностях низинных болот.

**Ключевые слова:** миграция элементов, геохимические барьеры, низинное болото

**DOI:** 10.31857/S0016752521060108

### ВВЕДЕНИЕ

Геохимические барьеры (ГХБ), на которых происходит резкое уменьшение интенсивности миграции химических элементов и их концентрации, являются важнейшим фактором дифференциации вещества в ландшафтах. По современным представлениям ГХБ – “открытая, неравновесная, динамическая, самоорганизующаяся система с множеством факторов, обуславливающих осаждение элементов” (Касимов, Борисенко, 2002). Из этого определения вытекает способность ГХБ к пространственно-временной самоорганизации, и, следовательно, необходимость изучения временных характеристик процессов их образования. Если время фильтрации или диффузии значительно больше времени переноса вещества (система с запаздыванием), то мы имеем дело с сосредоточенной системой. В обратном

случае будет система с распределенными параметрами. Именно в таких системах возможны согласованные структуры во времени и пространстве и их хаотическое чередование в различных точках (Хаустов, 2016).

Краевые зоны болот часто являются ГХБ, на которых накапливаются многие химические элементы, выщелоченные из донных болот и почв водоразделов. Элементный состав торфов может дать информацию как о процессах накопления, так о пути их попадания. Образующиеся аномальные концентрации элементов в торфах разных типов болот важно учитывать при поисках руд и проведении мероприятий по охране окружающей среды от загрязнения (Перельман, Касимов, 1999). Одним из первых предложил метод поиска руд путем анализа торфов в середине прошлого века финский геохимик М. Сальми, который об-

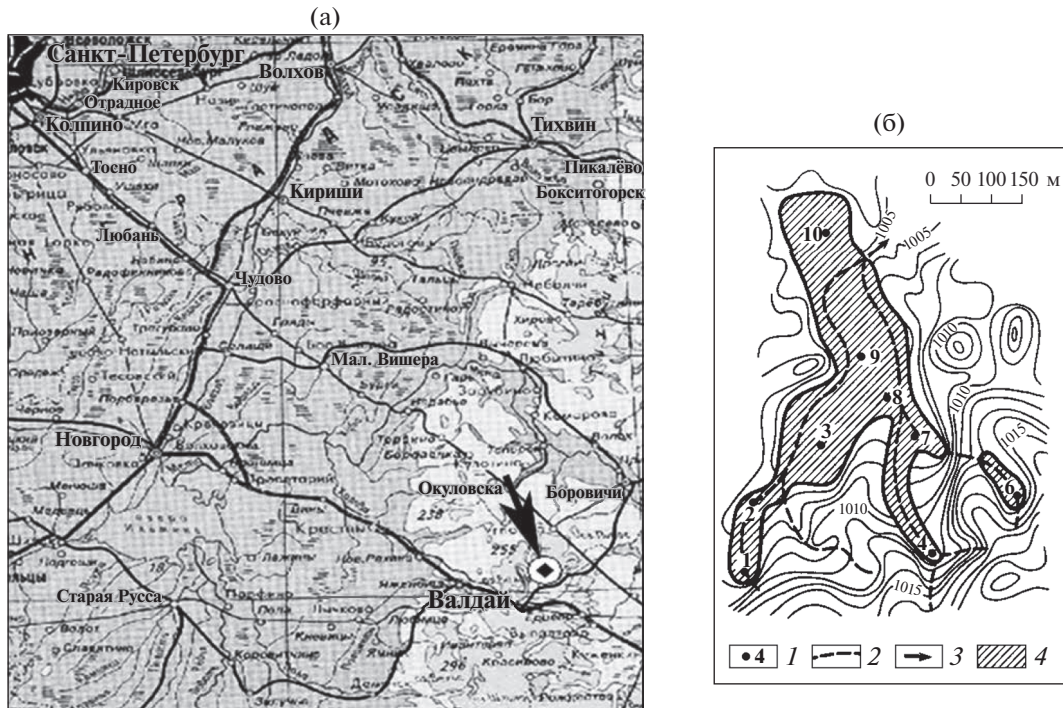


Рис. 1. Район исследований, показанный стрелкой (а), и схема низинного болота (б). 1 – точки отбора проб торфа и болотных вод; 2 – русла временных ручьев на поверхности болота; 3 – дренарующий ручей; 4 – тело торфомассива.

наружил геохимические аномалии меди, свинца, цинка, ванадия и титана в “висячем” на склоне торфянике вблизи рудных тел, перекрытых ледниковыми отложениями (Добровольский, 2002). Однако последующие исследования показали, что преобладающая часть биогеохимических аномалий в торфяниках обусловлена эффектом геохимического сопряжения (Steinmann, Shotyk, 1997; Malawska, Wiłkomirski, 2004; Orgu, 2006; Михайлова и др., 2012; Саввин и др., 2013;), либо атмосферными выпадениями (Гавшин и др., 2003; Бобров и др., 2011; Спиридонова, Василевич, 2017) и не связана с залежами руд. Известно, что торф обладает свойством прочно удерживать химические элементы в виде комплексов, но его возможности не безграничны (Ахметьева и др., 2015). Прямыми методами ультрафильтрации и диализа болотных и таежных речных вод установлена миграция водорастворимых и коллоидных фракций органоминеральных комплексов Fe и Al, контролирующих перенос большой группы микроэлементов (Pokrovsky et al., 2005; Piina et al., 2016). В результате миграции элементов с поверхностными и грунтовыми водами происходит формирование в торфяных отложениях динамических ландшафтно-геохимических барьеров (ЛГХБ), особенно характерных для низинных болот разного типа. Таким образом, необходимо исследование пространственного распределения элементов с учетом форм их нахождения, возраста торфов, и динамики состава природных вод.

В связи с выше изложенным, в работе поставлены следующие задачи: выяснить процессы формирования, пространственно-временную зональность и параметры ЛГХБ, которые характеризуют емкость, формы и избирательность концентрирования элементов. Для этого была применена комплексная методика ландшафтно-геохимических исследований (Глазовская, 1964; Перельман, Касимов, 1999).

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследованное низинное болото “Ольховое” находится в южно-таежной зоне в пределах Осташковской конечно-моренной гряды Валдайской возвышенности на территории Национального парка “Валдайский” (рис. 1а). Физико-географические условия этого района детально изучались многими исследователями (Экология..., 1980; Труды..., 2010).

### Характеристика района и объектов исследования

Болото состоит из основного массива площадью около 9 га и трех южных отвершков. Такое строение обусловлено морфологией первичной котловины. Отвершки начинаются у довольно крутых склонов ( $8^{\circ}$ – $10^{\circ}$ ) моренной гряды, ограничивающей болотный массив с юга и являющейся основным источником минерального питания торфомассива. Превышение гряды над по-

верхностью болота составляет 10–15 м и более (рис. 16).

Гряды сложены валунными карбонатными средне-суглинистыми опесчаненными конечно-моренными отложениями вепсовского ледникового яруса ( $glQ_{III}^4$ ) Валдайского оледенения (Скакальский, 1963). Конечная морена подстилается флювиогляциальными песками ( $fglQ_{III}^4$ ), которые выходят на поверхность южнее исследуемого болота. С поверхности суглинка перекрыты слоем маломощных покровных супесчаных образований, характерных для почв Северо-западной части европейской территории России. На приуроченных к вершинам и склонам моренных холмов дерново-палево-подзолистых почвах произрастают высоко продуктивные ельники-кисличники и ельники разнотравно-кустарничковые, запасы древостоя которых на отдельных типах условий местообитания достигают 800 м<sup>3</sup>/га (Акбари и др., 2006). Эвтрофный характер болота обусловлен грунтово-напорным и склоновым типом водного питания. Поверхность болота покрыта зарослями таволги (*Spiraea salicifolia*) и папоротника (*Athyrium filix femina*), по вымочкам растут рдест и вахта трехлистная. В древесном ярусе преобладает ольха серая (*Alnus incana*) высотой до 15 м.

Характеристика ландшафтных и литологических особенностей территории позволяет представить возможность существования исследованного низинного болота “Ольховое” на верхних “этажах” рельефа — значительно выше местного базиса эрозии ручья Таежный и, тем более, реки Лонинка (рис. 2).

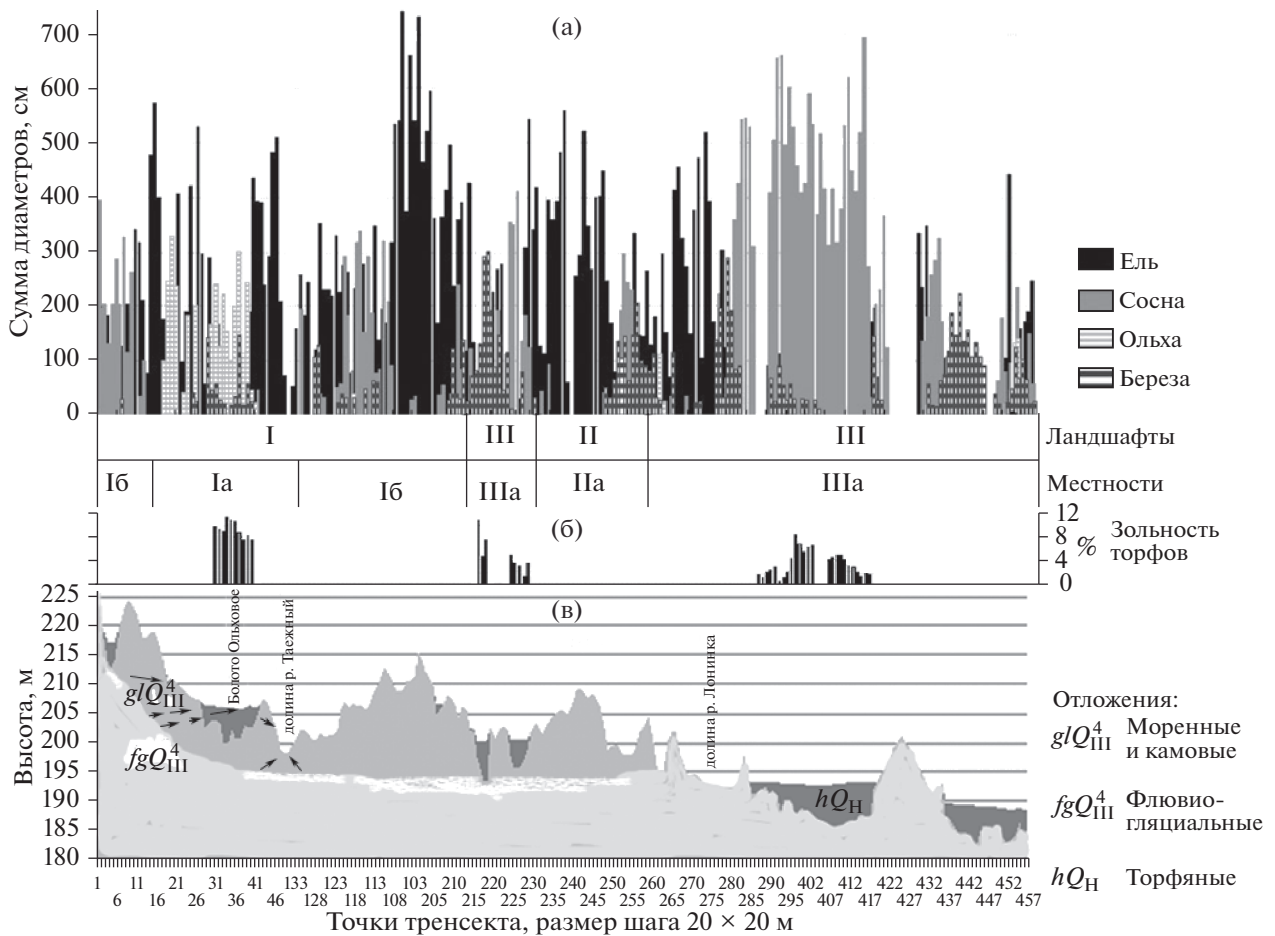
В других гумидных регионах низинные болота обычно характерны для пойм и террас рек и озер, глубоких ложбин, окраин болот других типов с выходами грунтовых и поземных вод. Положение исследованного низинного болота обусловлено именно литологическими и гидрогеологическими факторами, т. к. формируется за счет поступления минеральных веществ из “наваленных” конечно-моренных отложений с большим количеством включения валунов, гравия, гальки и песчано-алевролитовых линз. Богатый минералогический состав включений разной степени выветренности, значительное количество карбонатных включений, наличие песчаных линз и обуславливают грунтово-минеральное питание низинного болота. Разгрузка минерализованных грунтовых вод происходит по песчано-алевритовым линзам в теле конечно-моренной гряды (Скакальский, 1963). Однако это не уникальное явление — конечно-моренные зоны последнего оледенения, широко распространенные на территории европейской части России и других стран, имеют сложную ландшафтно-геохимическую обстановку.

**Методы полевых исследований.** В характерных частях болота были заложены опорные точки с отбором проб торфа, болотных вод и основных торфообразующих растений (рис 16). Точка 4 расположена в 10 м от места разгрузки вод (грунтовый сток маркируется постоянно действующим родником небольшого дебита, поверхностный сток — наличием минеральных зерен и наилка в слабовыраженном русле). Точка 7 находится в месте слияния двух южных отвершков — в среднем на расстоянии 100 м от разгрузки вод. Точка 8 расположена в южной части основного массива примерно в 180 м от гряды; точка 9 — в самой глубокой центральной части массива в 280 м от гряды; точка 10 — в северной части массива, вблизи истока ручья разгрузки с болота в 380 м от гряды. В точках №№ 8, 9, 10 устанавливали скважины из полиэтиленовых обсадных труб глубиной от поверхности 1.0 м. Откачка воды для определения динамики химического состава болотных вод производилась с глубины 1 м с помощью вакуумного пробоотборника, пробы воды консервировались толуолом. Отдельная проба отбиралась для определения pH и содержания  $C_{орг}$ .

Отвершки имеют монотонное строение травяно-древесного торфа мощностью около 1.0 м с несколько большей степенью разложения нижнего полуметрового слоя (45–55%) по сравнению с верхним слоем (40–45%). Сверху находится подстилочный горизонт мощностью 3–5 см, состоящий из опада и мха, переплетенных корнями. Наиболее глубокие горизонты основной залежи (глубже 1.8 м в точках 3 и 10 и глубже 2.5 м в точке 9) сложены менее разложившимися (<20%) сфагновыми торфами. Такая ситуация не уникальна. Так, по данным Н.И. Пьявченко (Пьявченко, 1976) отмечается ряд болот, особенно в восточной части Русской равнины, имеющих в верхней части типичный низинный характер, а нижняя часть залежи образована сфагновыми слабо разложившимися торфами.

Отбор проб торфа для химического анализа состава золы производился из керна по 20 см в средней части каждого морфологически выделяющегося генетического горизонта. Аликвотная часть образца для анализов отбиралась стандартным методом квартования воздушно сухого торфа.

Радиоуглеродная датировка самого верхнего слоя погребенных сфагновых торфов, взятых из керна на глубине 2.5–2.8 м в точке 9, показала возраст  $7470 \pm 250$  лет, т.е. начало атлантического климатического оптимума (Сысуев, 1980). С наступлением атлантического климатического оптимума вид торфа изменился — это преимущественно древесный низинный торф высокой степени разложенности. Природные процессы в дальнейшем, по-видимому, коренным образом не менялись — на это указывает накопление до-



**Рис. 2.** Сопряженные ландшафтные характеристики вдоль трансекта, пересекающего в точках 4, 8, 9, 10 исследованное болото “Ольховое” (см. рис. 1б) и прилегающие территории с юго-востока на северо-запад: а) ленточная лесотаксация; б) зольность торфов; в) схематическое литологическое строение (Акбари и др., 2006, с дополнениями). Ландшафты: I – ландшафт грядово-холмистой моренно-камовой равнины на средних карбонатных моренных суглинках (местность 1а – дренированные склоны и ложбины конечно-моренных гряд; местность 1б – камовые холмы и ложбины подстилаемые моренными отложениями); II – ландшафт грядово-котловинной камово-озовой равнины на песчано-супесчаных отложениях; III – ландшафт плоской озерно-водно-ледниковой равнины с грядами. Стрелками показана разгрузка грунтовых вод.

вольно однородной толщи низинного торфа мощностью около 2 м в центральной части и 1.5–1.0 м на периферии основного массива. Хорошо разложившийся торф (45–50%) имеет два четко выраженных по площади болота горизонта погребенных древесных остатков – в нижней части толщи на глубине 2.2–2.5 м (т. 9) и на глубине 0.5–0.6 м от поверхности. Наличие таких горизонтов свидетельствует об изменении водного режима болота. Возраст торфа на глубине 1.2–1.6 м по данным радиоуглеродной датировки  $4420 \pm 20$  лет.

#### Методика определения химического состава.

Особенность методики заключается в раздельном определении валового состава органической и минеральной компонент торфов. Образцы торфа и растений озолялись в муфеле при температуре 450°C. Растворение полученной золы проводили в 5%-ной HCl, минеральные примеси отделя-

лись. Для учета влияния растворимости минеральных примесей в 5%-ной HCl вносили поправку в результаты зольного анализа. Таким образом, состав 5%-ного солянокислого раствора золы отражает содержание минеральных элементов органического вещества торфа, поступивших с торфообразующими растениями, а также сорбированных, растворенных и коллоидных соединений из болотных вод. Параллельно классическим методом по Кноппу в золе определялось содержание  $\text{CO}_2$  карбонатов (Аринушкина, 1970). Содержание элементов рассчитывалось в окисной и элементной формах на абсолютно сухую “чистую” (безпримесную и безкарбонатную) навеску золы.

Полученная навеска минеральных примесей торфа подвергалась обработке горячим раствором 5% KOH для отделения аморфного  $\text{SiO}_2$ , ко-

**Таблица 1.** Зольность и содержание элементов (в % окислов) в органическом веществе торфов

Точка отбора проб	Глубина отбора, см	% сырой золы	% чистой золы	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO
				в % на “чистую” золу органического вещества				
10	6–30	30.10	5.27	33.00	11.14	7.03	25.18	3.74
10	30–80	32.43	5.73	14.38	19.49	7.75	47.37	3.10
10	80–160	33.78	4.05	16.72	10.77	6.00	53.45	3.95
10	160–280	68.19	7.61	28.78	7.50	11.0	38.46	4.38
4	6–30	71.05	32.70	43.24	26.27	8.08	10.24	2.31
4	35–80	69.68	21.25	25.62	32.62	9.47	18.70	3.89

торый количественно определялся в фильтрате и добавлялся к его содержанию в органической компоненте. Валовой состав минеральных примесей проводился по методике силикатного анализа при сплавлении навески с карбонатом натрия (Аринушкина, 1970). Определение элементов проводилось классическими и атомно-абсорбционными методами.

В болотных водах Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> определяли на ионном хроматографе, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> титриметрически, C<sub>орг</sub> — бихроматным методом, общее содержание кремния, алюминия, железа, и марганца — атомно-абсорбционными методами. Анализы выполнены в лабораториях кафедр географии почв и геохимии ландшафтов и физической географии и ландшафтоведения географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

За исключением оговоренных случаев, основные рассуждения построены на результатах расчетов содержания элементов или их окислов на абсолютно сухое беспримесное органическое вещество торфа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Воды поверхностного стока с окружающих холмов несут большое (для лесных водотоков) количество взвешенного материала, что легко устанавливается в руслах ручейков в тальвеге болота. Размер зерен достигает 1–2 мм и больше; минеральный состав их преимущественно кварцевый с примесью полевых шпатов. Совершенно очевидно и присутствие илистых взвесей. Стоковые воды на выположенной поверхности торфяников резко уменьшают скорость течения и взвеси выпадают на тело торфяника — болота являются своего рода отстойниками. Содержание минеральных примесей резко уменьшается в торфах по мере удаления от склонов: “сырая” зольность 60–75% в торфах головы отвершков, 55–60% в устье отвершков, и 30–35% в центре массива (табл. 1). Такое распределение характерно для поверхностных и средних горизонтов торфяной за-

лежи. В наиболее глубоких слоях торфа (сфагнового) количество минеральных примесей 25–35% и пространственно не контрастно.

### *Минеральные примеси как источник поступления элементов в торф*

Графики зависимости состава золы органического вещества торфа от количества минеральных примесей, нерастворимых в 5%-ной HCl, приведены на рис. 3. По графикам отчетливо выявляется закономерность: по мере увеличения минеральных примесей растет зольность органического вещества низинных торфов и увеличивается в составе чистой золы относительное содержание кремния и алюминия, в то время как содержание кальция (и сопутствующих магния, серы и др.) в той же пропорции уменьшается.

В результате в низинных торфах с количеством примеси до 35% от веса “сырой” золы преобладающим элементом является Ca; в торфах с количеством примесей от 35 до 55% содержание CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> примерно одинаково и составляет по 25–35% от веса золы; в низинных торфах с количеством примесей более 55% преобладающими элементами в золе являются SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, содержание CaO уменьшается до 10–15%. В связи с этим классическое подразделение торфов на нормально зольные и высокозольные (Никонов, 1955; Пьявченко, 1976) получает генетическое содержание. Нормально зольные низинные торфа с содержанием примесей менее 35% получают минеральное питание преимущественно в растворенном виде. Минеральное питание осуществляется водами поверхностного и главным образом грунтового стока, основными компонентами в которых является Ca и сопутствующие ему Mg, S, и др.

Для выяснения роли процессов выщелачивания минеральных частиц в условиях низинного болота проанализируем валовой состав минеральных примесей, выделенных в ходе зольного анализа торфов. Для примера взято два разреза торфа — в точках 4 и 10, контрастных по условиям питания и количеству примесей (табл. 1, 2).

Валовой состав примесей изменяется по вертикальному профилю торфа, но остается близким на одной глубине от поверхности в разных частях торфомассива. Заметно увеличение содержания кремнезема и уменьшение содержания остальных элементов в минеральных примесях вниз по профилю торфа, по-видимому, за счет выветривания части алюмосиликатных минералов, поступивших в торфяник, и остаточного накопления кварца.

Процессы выщелачивания алюмосиликатов и сорбционно-десорбционных процессов при миграции элементов находят отражение в химическом составе торфяных вод (табл. 3, 5).

Так, в летнюю межень после длительного взаимодействия торфяных вод с минеральной и органической фазами торфов максимальные концентрации Al в водах приурочены к участкам торфа, наиболее обогащенным минеральными примесями (в т. 1 – 0.772 мг/л, в т. 7 – 0.736, в т. 4 – 0.466 мг/л), и уменьшаются по направлению стока. Перераспределение элементов внутри торфа в силу различных параметров сорбции их соединений по мере фильтрации отражается соотношением этих элементов в болотных водах (табл. 3). В то время как содержание Al в водах по направлению потока к дренирующему ручью в несколько раз уменьшается, содержание Si отчетливо возрастает. В результате величина молекулярного отношения  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  в водах изменяется от 2.5–4.5 в отвершках болота до 21–22 в центре массива и до 45–47 вблизи дренирующего ручья. То есть, при формировании минерального состава торфа наблюдается преимущественный вынос кремнезема с водами, тогда как алюминий сорбируется в органической части торфа.

Таким образом, формирование содержания Si и Al в органической фазе низинных торфов, происходит очевидно при участии процессов выветривания привнесенных алюмосиликатов, и дифференциация этих элементов в процессах массопереноса. Процессы разрушения алюмосиликатов в условиях низинного торфообразования естественно существенно менее интенсивны, чем на верхо-

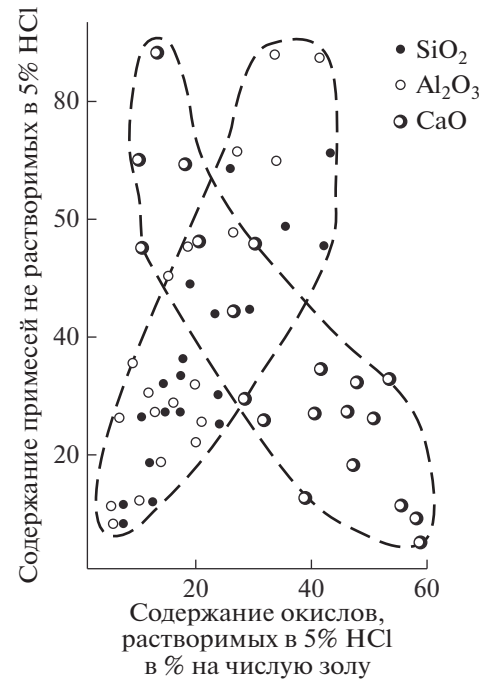


Рис. 3. Зависимость химического состава золы органического вещества торфов (в % на чистую, беспримесную бескарбонатную золу) от содержания минеральных примесей (% “сырой” золы).

вых болотах, где может разрушаться даже кварц (Dugmore et al., 1992).

#### Биогеохимические процессы поступления элементов в торф

Выяснение роли процессов аккумуляции элементов на биогеохимическом барьере при торфообразовании рассмотрим на примере сопряженного анализа химического состава органического вещества торфа и основных растений-торфообразователей (ольхи серой, таволги вязолистной, и папоротника) (табл. 4). В характерной точке массива – точке 4, наблюдается хорошо разложившийся однородный древесный торф под густой травянистой растительностью и типичным дре-

Таблица 2. Содержание элементов (в % окислов) в минеральных примесях торфов

Точка отбора проб	Глубина отбора, см	% сырой золы	% чистой золы	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO
				в % на прокаленную навеску минеральных примесей				
10	6–30	30.10	5.27	82.13	8.94	1.05	1.35	1.24
10	30–80	32.43	5.73	86.34	7.57	0.63	0.77	0.82
10	80–160	33.78	4.05	83.99	7.41	0.88	1.06	0.97
10	160–280	68.19	7.61	84.31	8.04	1.05	1.08	0.54
4	6–30	71.05	32.70	81.12	10.02	1.70	1.05	0.52
4	35–80	69.68	21.25	85.47	7.31	1.23	1.05	0.43

**Таблица 3.** Химический состав грунтовых вод низинного болота в межень (17.08.2013), мг/л

Точка отбора проб	pH	C <sub>орг</sub>	HCO <sup>3-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Si <sub>общ</sub>	Fe <sub>общ</sub>	Al <sub>общ</sub>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mn <sub>общ</sub>
4	5.73	29.8	12.8	1.8	25.1	2.16	1.787	0.466	9.6	1.0	1.7	1.5	0.025
7	6.78	52.1	67.1	1.5	27.7	0.80	3.963	0.736	26.4	1.4	2.0	1.8	0.067
8	6.99	78.9	115.9	2.2	40.5	2.24	1.678	0.097	88.8	35.0	1.8	1.9	0.080
9	6.76	74.0	361.3	0.9	21.0	2.16	0.622	0.097	70.4	31.7	2.1	2.7	0.015
10	6.79	81.6	453.8	2.2	25.9	2.96	1.507	0.064	66.4	11.0	1.6	0.9	0.119
Ручей	6.17	47.5	60.5	2.0	20.2	н.д.	0.948	0.233	32.0	4.1	1.5	1.0	0.028

**Таблица 4.** Содержание элементов в растениях-торфообразователях и их соотношение к содержанию в низинном торфе (% чистой беспримесной золы, и % элементов в органическом веществе проб растений и торфа)

Объект	Точка отбора проб	Зола, %	Si	Fe	Al	Ca	Mg	K	Na	Mn	P	S
Ольха, листья	4	6.11	0.170	0.059	0.001	1.955	0.377	1.310	0.010	0.040	0.162	0.115
Ольха, ветви	4	1.78	0.020	0.011	0.003	0.675	0.101	0.246	0.020	0.021	0.067	0.040
Ольха, корни, живые	4	8.21	0.103	0.334	0.209	1.137	0.102	0.243	0.182	0.038	0.114	0.089
Ольха, корни разложившиеся	4	6.75	0.166	0.375	0.081	2.490	0.239	0.023	0.065	0.011	0.065	0.621
Папоротник	4	8.89	1.033	0.068	0.015	1.052	0.551	2.888	0.020	0.036	0.167	0.086
Таволга	4	3.73	0.356	0.042	0.003	0.505	0.369	0.888	0.009	0.088	0.056	0.102
Среднее	-	5.91	0.308	0.148	0.052	1.302	0.290	0.933	0.051	0.039	0.105	0.176
Торф 5–50 см	4	32.7	6.609	1.848	4.547	2.393	0.456	0.385	0.109	0.096	0.408	0.576
Торф/растение*	-	5.53	<b>21.46</b>	<b>21.49</b>	<b>87.44</b>	<i>1.84</i>	<i>1.57</i>	<i>0.41</i>	<i>2.14</i>	<i>2.48</i>	<i>3.88</i>	<i>3.28</i>

\* Жирным шрифтом показаны значения существенно больше, а курсивом – меньше среднего значения соотношения.

востоем ольхи с постоянным увлажнением поверхностным и грунтовым стоком – соблюдаются типичные условия низинного торфообразовательного процесса.

Средний состав органического вещества торфообразователей (строка “среднее”) рассчитан из предположения о примерно равном их весовом соотношении при преобразовании в торф. В принципе возможен расчет в соответствии с весовым вкладом каждого органического компонента, с учетом баланса прихода–расхода элементов с водой и дальнейшей детализацией, как это делается при детальном расчете баланса вещества и скорости роста торфяников (Steinmann, Shotyck, 1997; Frolking et al., 2010). Однако, этот подход, достаточно корректный только для верховых болот, выходит за рамки работы. Поскольку в нашем случае скорость поглощения, разложения и выноса элементов из разных растительных остатков, а также детальный водный баланс болота не известны, принята очень простая оценка источников поступления элементов в торф – считаем, что минеральные примеси (или содержание Ti) своеобразный маркер процессов.

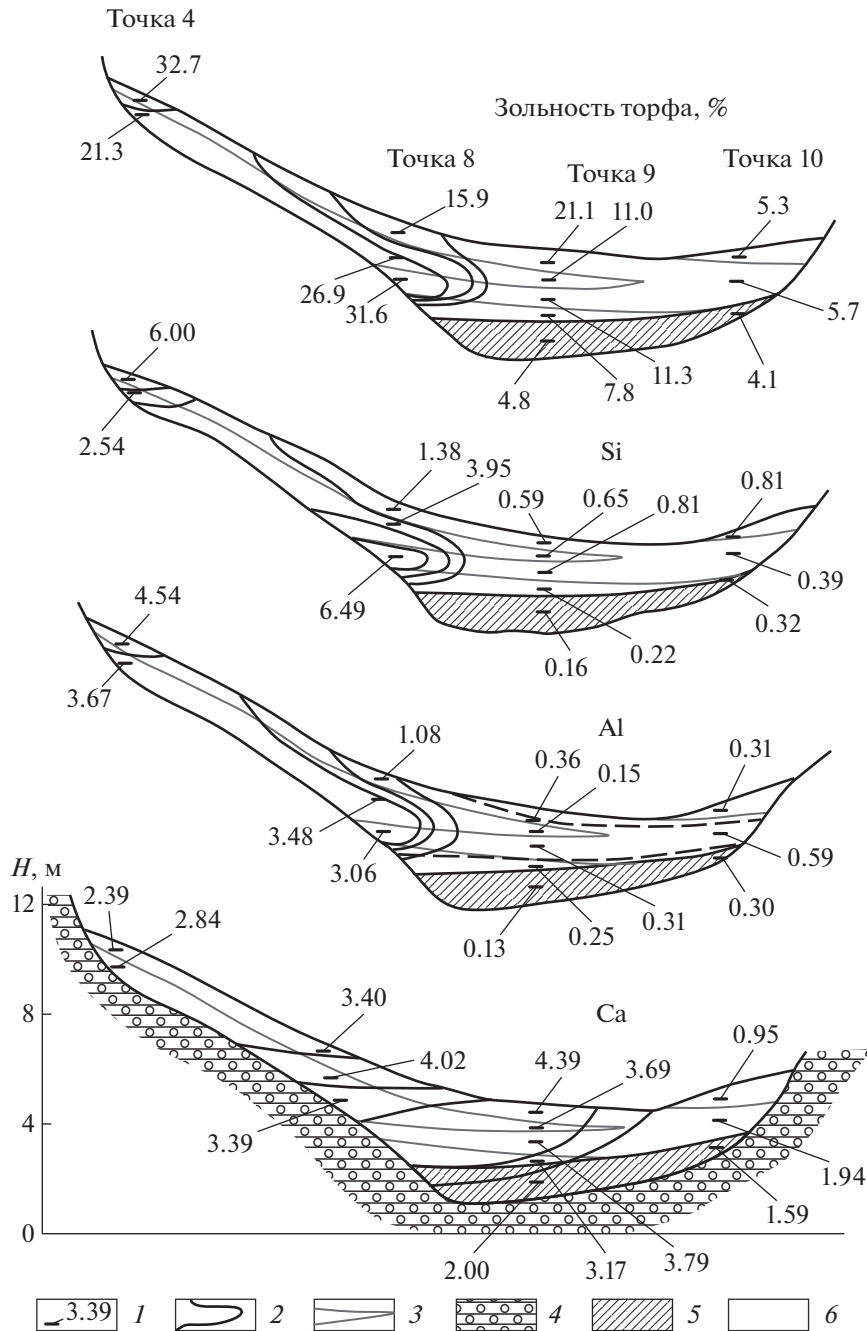
Соотношение средней зольности растений к зольности торфа (строка “торф/растение”) со-

ставляет 5.5, т.е. можно считать, что содержание чистой золы увеличилось в 5.5 раз при преобразовании среднего “опада” растений в торф. Сравнение с другими элементами показывает, что эти отношения для Si, Fe составляют 21.5, а для Al и даже 87.4. Такое отличие соотношений элементов от соотношения зольностей (на порядок) подчеркивает, что для этих элементов характерно накопление их в торфах именно за счет приноса и разложения минеральных взвесей, а никак не счет биологического накопления при торфообразовании.

Напротив, величина торф/растения отношения содержаний Ca, Mg (1.8 и 1.6), а также Na, Mn, P, S (2.1; 2.5; 3.9 и 3.3 соответственно), намного ниже соотношения зольностей, что может свидетельствовать о биогеохимическом накоплении элементов в торфе. Особенно низкое соотношение для K (0.4) подчеркивает его интенсивное биологическое поглощение.

#### *Пространственное распределение элементов в торфянике низинного болота*

Источники минерального питания прослеживаются при изображении двумерного распределения минеральных компонентов в органическом



**Рис. 4.** Схема распределения минеральных компонентов по вертикальному профилю торфов низинного болота, в % на сухое органическое вещество торфа: 1 – зольность и содержание элементов в точках отбора; 2 – изолинии зольности и содержания элементов; 3 – стратиграфические границы торфа; 4 – моренные суглинки; 5 – слабообразованные сфагновые торфа; 6 – древесные и травяно-древесные торфа.

веществе торфов по характерному профилю низинного болота, проведенному через точки 4, 8, 9, 10 (рис. 4).

**Содержание основных элементов силикатных минералов.** (Si, Al, Ti, Na и K), поступающих главным образом с поверхностным стоком и накапливающиеся на механическом барьере тесно коррелирует с содержанием минеральных примесей

и распределением зольности низинных торфов. Экстремально высокие содержания Al и особенно Si в верхнем горизонте торфа в самых верхних горизонтах болота (т. 4 и 8) связано с резкой интенсификацией эрозии почв в связи с их распашкой более 200–400 лет назад. Эродируются верхние горизонты почв пылеватого-алевритового гранулометрического состава (Сысуев, 1986). Эти фракции



обладают меньшей способностью к переносу в водном потоке и сразу осаждаются на поверхности отвершков, не разносясь по поверхности основного массива болота. Близкое содержание примесей в верхних и средних горизонтах торфа основного массива (т. 9, 10) свидетельствует о том, что интенсивность процессов эрозии на окружающих территориях с эпохи атлантического оптимума изменялась слабо.

В процессе торфообразования нарушаются соотношения Si и Al, свойственные алюмосиликатным минералам, являющимся основными источниками этих элементов на низинном болоте. Наблюдается резкое уменьшение молекулярных отношений  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  в нижележащих горизонтах по сравнению с поверхностным горизонтом торфа. В верхних горизонтах величина отношения около 3 или выше. Такое отношение характерно для илистой фракции окружающих почв, развитых на моренных суглинках с каолинит-гидрослюдистым составом глинистых минералов (Сысуев, 1986). В нижних же горизонтах величина молекулярного отношения редко превышает 2. Таким образом, при выветривании алюмосиликатов в верхнем горизонте торфяника наблюдается фракционирование этих элементов — наблюдается преимущественный вынос кремнезема с водами, тогда как алюминий закрепляется в органической части торфа. Это согласуется с соотношением этих элементов в болотных водах в период летней межени (табл. 3). В то время как содержание Al в водах по направлению потока к дренирующему ручью в несколько раз уменьшается, содержание Si отчетливо возрастает. В результате величина молекулярного отношения  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  в водах изменяется от 2.5–4.5 в отвершках болота до 21–22 в центре массива и до 45–47 вблизи дренирующего ручья. Процессы фракционирования Si и Al, по-видимому, имеют физико-химическую основу. В работе (Фотиев, Фотиева, 1974), проанализировавших вымороченное водно-растворимое органическое вещество вод переходного болота в Тверской области, показано, что с менее дисперсной коллоидной фракцией размером  $>60 \text{ \AA}$ , составляющей 70–75% органического вещества, связаны Fe, Al, Ca, Mg. Более дисперсная фракция размером  $<60 \text{ \AA}$  — ионно-растворимая фракция органического вещества, связана только с кремнеземом, т.е. состав органоминеральных комплексов обуславливает их дисперсность. Аналогичные результаты показали работы по ультрафильтрации болотных вод (Pokrovsky et al., 2005). Так что при фильтрации вод через пористую массу торфа менее диспергированная коллоидная фракция органического вещества может в значительной мере задерживаться, а вместе с ней аккумулируются в торфянике Fe, Al, Ca, Mg. Кремнезем же, связанный с так называемой ионно-растворимой фракцией орга-

нического вещества, вымывается из торфа в большей степени.

Ведущим фактором распределения содержания кальция и сопутствующих элементов в низинных торфах являются грунтовые воды (см. схему на рис. 2). Вследствие этого изолинии содержания Ca в золе торфов отчетливо фиксируют зону разгрузки грунтовых вод и путь их фильтрации внутри торфомассива (рис. 4).

Ареал максимального содержания Ca сдвигается от средних горизонтов в точку 8 к поверхностному слою торфа в точке 9 в соответствии со схемой фильтрации грунтового потока, выклинивающегося в ложе торфяника. Движение грунтовых вод, высачивающихся в тело торфяника с близкими коэффициентами фильтрации по всему разрезу, проходит вдоль скрытой слоистости торфа с постепенным подъемом кверху в зону торфогенного слоя и очеса, где коэффициенты фильтрации выше (Маслов, 2008). Причиной выклинивания в торфяник потока грунтовых вод в районе точки 8 служит “литологическое окно” в ложе торфяника, которое является, по-видимому, выходом одной или нескольких песчаных линз, находящихся на глубине 3–10 м внутри моренных суглинков (Скакальский, 1963).

Эти результаты подтверждаются анализами химического состава торфяных вод. Максимальное содержание  $\text{Ca}^{2+}$  (88 мг/л) в меженных водах, наблюдается именно в точке 8 — предполагаемом месте выклинивания грунтовых вод (табл. 3). По мере удаления от зоны выклинивания грунтовых вод концентрация  $\text{Ca}^{2+}$  постепенно уменьшается в сторону дренирующего ручья. Воды торфов, находящиеся вне подпитывания зоны выклинивания грунтовых вод, содержат в 4–8 раз меньше  $\text{Ca}^{2+}$ . Столь значительные различия являются подтверждением происходящей разгрузки грунтовых вод вблизи точки 8. Показательна и величина отношения Ca/Mg. Так, в зоне выклинивания грунтовых вод она составляет 2.0–2.5 из-за большой доли доломитовой составляющей в карбонатах моренных отложений. Там, где питание болотных вод происходит преимущественно за счет поверхностного стока, это отношение значительно выше и составляет 10 и более, характеризую соотношение этих элементов в опаде, подстилке и других почвенных горизонтах, из которых они вымываются.

В период половодий воды торфяника разбавляются, причем, чем ближе точка к фронту питания, тем интенсивнее разбавление (табл. 5).

Так, из данных табл. 3 видно, что в точке 8 содержание  $\text{Ca}^{2+}$  к 10.XI уменьшилось почти в 4 раза, в точке 9 посередине болота — в 2 раза, а в точке 10 — всего в 1.5 раза. В результате к середине осени наблюдалось выравнивание, а поздней осенью — даже инверсия распределения concentra-

**Таблица 5.** Динамика некоторых характерных компонентов химического состава грунтовых вод низинного болота в осеннее половодье 2013 г., мг/л

Место отбора проб	Al <sub>общ</sub>					Ca <sup>2+</sup>				
	скважины, разрезы				ручьи	скважины, разрезы				ручьи
	17.08*	11.09	10.10	11.11		10.11	17.08	11.09	10.10	
Точка 1	0.772	—	—	—	0.624	17.6	—	—	—	9.6
Точка 8, скв.11	0.097	0.084	0.114	—	—	88.8	42.0	23.2	—	—
Точка 9, скв.18	0.097	0.214	0.238	—	—	70.4	43.2	35.2	—	—
Точка 10, скв.15	0.064	0.341	0.346	0.233	0.365	66.4	55.2	41.6	32.0	20.0
Ручей “Тажный”	—	—	—	0.317	0.656	—	—	—	26.4	17.6

\* В строке показаны даты отбора проб воды из скважин, разрезов и ручьев.

**Таблица 6.** Особенности состояния водной, твердой и газообразной фаз в грунтовых водах водосбора Усадье (Злобина и др., 2017)

Фаза	Показатель	Геофильтрационные области водоносного горизонта		
		Питание	Транзит	Разгрузка
Водная	H <sup>+</sup> , моль/кг	8.36E-07	1.09E-07	1.39E-07
	CaCO <sub>3</sub> aq	6.21E-09	5.04E-06	4.73E-06
Твердая	S <sub>CaCO3</sub>	<b>-3.05</b>	<b>-0.147</b>	<b>-0.17</b>
	S <sub>SiO2</sub>	<b>-0.49</b>	<b>-0.208</b>	<b>-0.12</b>
Газовая	CO <sub>2</sub> aq	3.51E-04	8.03E-04	1.19E-03

ций кальция в водах торфяника: в зоне разгрузки грунтовых вод она была ниже, чем в центре болота и тем более на его периферии. Такое разбавление вод торфяника обусловлено активным водообменом между водами паводкового осеннего стока, проходящего транзитом по поверхности болота, и грунтовыми водами, высачивающимися в тело торфяника с меньшими на порядки расходами. Содержание Ca<sup>2+</sup> в водах поверхностного стока, поступающих из южных отвершков, по мере протекания по основному массиву торфяника увеличивается от 9.6 мг/л (что близко к среднему содержанию в водах поверхностного стока в лесу — 9.2 мг/л) до 20.0 мг/л, т.е. при формировании химического состава стоковых вод в периоды половодий происходит вынос Ca из торфяника. По этим материалам нельзя судить, происходит ли в торфах прогрессивное накопление или обеднение кальцием, поскольку его поступление с грунтовыми стоком трудно оценить. Однако важно отметить, что ни в одной точке торфяника концентрация кальция не достигла состояния насыщения ионообменных групп в торфе. Максимальное содержание Ca в торфах исследованного болота составляет 4.02–4.39%. Предельное содержание Ca в нормально зольных торфах без признаков минерализации составляет около 5% (Никонов, 1955).

Расчеты карбонатно-кальциевого равновесия для грунтовых вод на водосборе Усадье в нескольких километрах от объекта наших исследований, с аналогичными литологическими и гидрогеохи-

мическими условиями, выявили их недосыщенность по кальцию и кремнезему (Злобина, Юшманов, 2003; Злобина и др., 2017). Индексы насыщения получены в расчетах по термодинамическим моделям программы “Равновесия” (Акинфиев, 1997), учитывающих химический состав грунтовых вод на рассматриваемых водосборах и комплекс геохимических взаимодействий, связанных с растворением карбонатов, катионным обменом и выветриванием алюмосиликатов. Расчеты показали изменение гидрохимического режима в геофильтрационном потоке от области питания до области разгрузки подземных вод: с изменением щелочно-кислотных условий наблюдается уменьшение безразмерных индексов насыщения для основных породообразующих минералов: для кальцита S<sub>CaCO<sub>3</sub></sub> от -3.05 до -0.17, для силикатов S<sub>SiO<sub>2</sub></sub> от -0.49 до -0.12 (табл. 6).

Отрицательные значения индекса в грунтовых водах вплоть до разгрузки в водоем показывают недосыщенность по отношению к основным породообразующим минералам. Естественно, что при фильтрации в торфе воды становятся еще более недосыщенными и агрессивными, вследствие уменьшения pH до 5.7–6.9 и присутствия большого количества органических кислот (C<sub>орг</sub> = 30–80 мг/л) на исследованном низинном болоте.

Для вод Васюганского болотного массива в Западной Сибири также не выявлено ни в одном низинном болоте возможного образования кар-

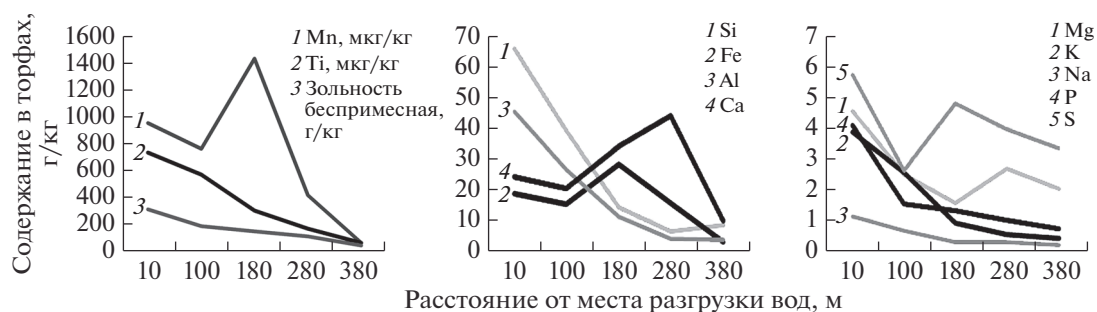


Рис. 5. Концентрация элементов в верхнем горизонте торфа (0.2–0.5 м) вдоль ландшафтно-геохимического барьера низинного болота “Ольховое” в зависимости от удаленности от источников поступления.

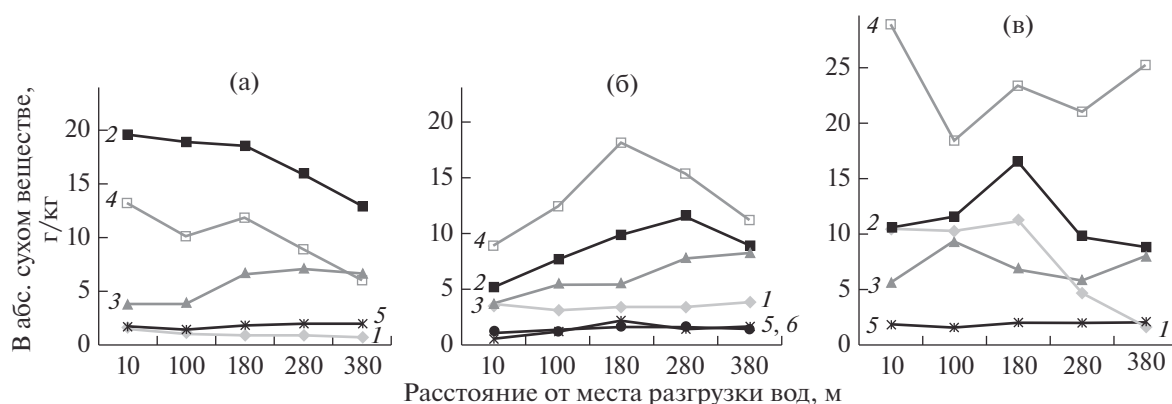


Рис. 6. Изменение вдоль ЛГХБ концентрации главных элементов зольного состава (в г/кг) на сухое вещество: а) листьев ольхи серой, б) таволги вязолистной, в) папоротника – Индексы у графиков: 1 – Si; 2 – Ca; 3 – Mg; 4 – K; 5 – P; 6 – S.

бонатом – все болотные воды не насыщены относительно кальцита и неравновесны с первичными алюмосиликатами, вследствие чего формируется воды кислого кремнисто-органического и кремнисто-кальциевого геохимического типов (Здвижков, 2005; Савичев, 2015).

#### Характеристика параметров ландшафтно-геохимического барьера

Характеристика возможной емкости ЛГХБ показана при анализе пространственного распределение главных элементов в поверхностных слоях торфа – анализе снижения концентраций в направлении от источников. Данные содержания элементов на абсолютно сухую навеску, полученные для средних проб верхнего горизонта хорошо разложившихся низинных торфов (ниже корнеобитаемого слоя на глубине 0.2–0.5 м), представлены на рис. 5. По мере удаления от моренной гряды происходит близкое к экспоненциальному уменьшение содержания элементов в торфах Si, Al, Ti, Na, K, – элементов, поступающих преимущественно с минеральными примесями (рис. 5). Причем, в этом же направлении уменьшаются также и линейные градиенты концентраций: от  $-1.38$  до

$-0.38$  г/кг/м для зольности, от  $-0.30$  до  $-0.02$  г/кг/м для Si, от  $-0.21$  до  $-0.01$  г/кг/м для Al, от  $-3.38$  до  $-1.06$  мг/кг/м для Ti. Т.е. наибольшие градиенты концентраций на механическом геохимическом барьере наблюдаются непосредственно в месте разгрузки поверхностного стока.

Как видно из графиков (рис. 5) Ca, Mg, S, Fe и Mn имеют существенно отличное распределение на геохимическом барьере, по сравнению с распределением элементов поступающих с минеральными примесями (Si, Al, Ti, а также Na, K). Ведущим фактором распределения содержания этих элементов в низинных торфах являются грунтовые воды. Вследствие этого содержание Ca, Mg, S, Fe и Mn в золе торфов отчетливо фиксируют зону разгрузки грунтовых вод.

Для выявления закономерностей биогеохимических процессов аккумуляции на рис. 6 приведены графики изменения концентрации главных элементов зольного состава основных растений-торфообразователей вдоль исследованного ЛГХБ.

Четкой дифференциации элементов в растениях в зависимости от удаленности от источников поступления не обнаруживается: только в листья таволги содержание Ca, Mg, K и S более или

менее закономерно отражает их пространственное распределение в торфах. В листья ольхи наблюдается постепенно уменьшение содержания Са, К, и Si и некоторый рост Mg и P по мере удаления от источников выноса (рис. 6). У папоротника концентрации самые высокие, но разнонаправленные изменения не имеют четкой тенденции — только для Са, К, и Si можно отметить возрастание содержаний в точке 8 (180 м).

Таким образом, нет оснований роль биогеохимических процессов считать существенной в формировании ЛГХБ низинного болота.

*Определение контрастности геохимического барьера (К)* проведено на период межени, поскольку наблюдается интенсивная сезонная динамика химического состава вод низинного болота и концентрации вод грунтового и поверхностного стока. Контрастность исследованного ЛГХБ, рассчитанная как соотношение содержаний компонентов в водах до и после барьера (табл.3), составляет для концентрирующихся элементов  $K_{Al} \sim 12-10$ ,  $K_{Ca} \sim 8-4$ ,  $K_{Fe} \sim 6-4$ ,  $K_{Mn} \sim 4-3$ ,  $K_S \sim 2-1.5$ ; для слабо концентрирующихся элементов  $K_{Cl, K, Na} \sim 1.5-0.8$ , для не концентрирующихся  $K_{Si} \sim 1-0.3$ .

Таким образом, в исследованном низинном болоте формируется комплексный ландшафтно-геохимический барьер. Для Si, Al, Ti, Na, К — элементов, поступающих преимущественно с поверхностным стоком и накапливающихся на поверхности болота благодаря действию механического барьера, в результате растворения минеральных примесей, сорбции торфами и фильтрации растворов характерно монотонное уменьшение содержания по мере удаления от склонов моренной гряды. Для Са, Mg, S, Fe и Mn ведущим фактором распределения содержания в низинных торфах является миграция с грунтовыми водами — накопление элементов обусловлено действием сорбционного барьера. Под действием фильтрации и сорбции их содержание в торфах отчетливо фиксируют зону разгрузки грунтовых вод. Комплексный барьер за время формирования в голоцене недосыщен по всем элементам и ожидать выпадение новообразованных минералов на исследованном низинном болоте маловероятно.

## ВЫВОДЫ

Исследовано формирование ландшафтно-геохимического барьера низинного болота в ложбине конечно-моренной гряды. Химический состав торфов и вод низинного болота обусловлен сложным пространственно-временным взаимодействием процессов поверхностного и грунтового стока со специфическими процессами торфообразования, разложения минеральных примесей и сорбционно-десорбционными особенностями торфов.

Для Si, Al, Ti, Na, К — элементов, поступающих преимущественно с поверхностным стоком и накапливающихся благодаря действию механического барьера, в результате выветривания минеральных примесей и сорбции торфами, характерно монотонное уменьшение содержания по мере удаления от склонов моренной гряды.

Для Са, Mg, S, Fe и Mn ведущим фактором распределения содержания в низинных торфах является миграция с грунтовыми водами. Под действием фильтрации и сорбции их содержание в торфах отчетливо фиксируют зону разгрузки грунтовых вод.

Контрастность исследованного ЛГХБ, рассчитанная как соотношение содержаний компонентов в водах до и после барьера, составляет для концентрирующихся элементов  $K_{Al} \sim 12-10$ ,  $K_{Ca} \sim 8-4$ ,  $K_{Fe} \sim 6-4$ ,  $K_{Mn} \sim 4-3$ ,  $K_S \sim 2-1.5$ ; для слабо концентрирующихся элементов  $K_{Cl, K, Na} \sim 1.5-0.8$ , для не концентрирующихся  $K_{Si} \sim 1-0.3$ .

В условиях гумидного климата массив низинного болота является эффективным комплексным геохимическим барьером, интенсивно поглощающим химические вещества, мигрирующие как в растворенном, так и во взвешенном состоянии. Причем за все время существования в голоцене барьер недосыщен по всем элементам и ожидать минерализацию на исследованном низинном болоте маловероятно. Это свидетельствует о высоких водоочистных способностях низинных торфов.

Полученные характеристики ЛГХБ низинного болота необходимо учитывать как при поисках полезных ископаемых, так и при планировании рационального природопользования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акбари Х.Х., Бондарь Ю.Н., Сысуев В.В. (2006). Индикационные свойства древостоя в ландшафтах краевой зоны валдайского оледенения. *Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География*. № 6. С. 59-66.
- Акинфиев Н.Н. (1997). Термодинамическое описание свойств водных растворов в широком диапазоне параметров. *Геохимия*. (8), 897-906.
- Akinfiyev N.N. (1997). Thermodynamic description of the properties of aqueous solutions over a wide range of parameters of state. *Geoch. Int.* 35(8), 882-903.
- Аринушкина Е.В. (1970). Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Московского университета, 487 с.
- Ахметьева Н.П., Лапина Е.Е., Лола М.В. (2015) *Экологическое состояние природных вод водосбора Ивановского водохранилища и пути по сокращению их загрязненности*. М.: URSS, 240 с.
- Бобров В.А., Богущ А.А., Леонова Г.А., Краснобаев В.А., Аношин Г.Н. (2011) Аномальные проявления концентраций цинка и меди в торфянике верхового болота Южного Прибайкалья. *ДАН*. 439(6), 784-788.

- Гавшин В.М., Сухоруков Ф.В., Будашкина В.Д., Мельгунов М.С., Бобров В.А. (2003). Свидетельства фракционирования химических элементов в атмосфере Западной Сибири по данным исследования верхового торфяника. *Геохимия*. (12), 1337-1344.
- Gavshin V.M., Sukhorukov F.V., Budashkina V.V., Mel'gunov M.S., Bobrov V.A. (2003). Fractionation of chemical elements in the atmosphere of Western Siberia as evidenced from data on a raised peat bog. *Geochem. Int.* **41**(12), 1226-1233.
- Глазовская М.А. Геохимические основы типологии и методики исследования природных ландшафтов. Изд-во Моск. университета, 1964, 230 с.
- Добровольский В.В. (2002) *Основы биогеохимии*. М.: "Академия", 353 с.
- Здвижков М.А. Гидрогеохимия Васюганского болотного массива. (2005) Автореф. дис. канд. геол.-мин. наук. Томск: ТПУ, 23 с.
- Злобина В.Л., Юшманов И.О. (2003). Изучение продвижения фронта закисления грунтовых вод на заболоченном водосборе. *Водные ресурсы*. **30**(5), 1-6.
- Злобина В.Л., Медовар Ю.А., Юшманов И.О. (2017) Трансформация состава и свойств подземных вод при изменении окружающей среды. М.: Мир науки, 2017. 191 с. <http://izd-mn.com/PDF/21MNNPM17.pdf>
- Касимов Н.С., Борисенко Е.Н. (2002) *Становление и развитие учения о геохимических барьерах. Геохимические барьеры в зоне сипергенеза*. М.: МГУ, 6-37.
- Маслов Б.С. Гидрология торфяных болот. Томск: Издательство ТГПУ, 2008. 424 с.
- Михайлова А.В., Подколзин И.В., Ахметьева Н.П., Саввин С.Б. (2012) Редкие и тяжелые металлы в торфяниках верховых и низинных болот. *Аналитика Сибири и Дальнего Востока. Сб. трудов IX Научной конференции*. Красноярск. С. 264
- Никонов М.Н. (1955) Происхождение золы в торфах. *ДАН СССР*. **105**(2), 309-312
- Перельман А.И., Касимов Н.С. (1999) Геохимия ландшафтов. М.: "Астрей-2000", 768 с.
- Пьявченко Н.И. (1976) *Об изучении болот в связи с проблемой "человек и биосфера". История биогеоценозов СССР в голоцене*. М.: Наука, 187 с.
- Саввин С.Б., Ахметьева Н.П., Михайлова А.В., Ермолаева В.Н., Подколзин И.В. (2013) *Редкоземельные элементы в торфах Московской и Тверской областей*. ДАН. **448**(1), М.: Наука, 86-88.
- Савичев О.Г. (2015) Геохимические показатели болотных вод в таежной зоне Западной Сибири. *Известия РАН. Серия географическая*. (4), 47-57.
- Скакальский. Б.Г. (1963) Гидрогеологические и гидрохимические особенности стока с логов зоны избыточного увлажнения. *Тр. ГГИ*. 102, 241-253.
- Спиридонова В.А., Василевич Р.С. (2017) Геохимия тяжелых металлов торфяников криолитозоны. *XXIV Все-российская молодежная научная конференция "Актуальные проблемы биологии и экологии", посвященная 55-летию Института биологии Коми НЦ УрО РАН*. Сыктывкар: ИБК НЦ УрО РАН, 114-116
- Сысуюев В.В. (1980) Ландшафтно-геохимические процессы в голоцене: реконструкция по отложениям низинного болота. *Почвоведение*, № 5, с. 71-81.
- Сысуюев В.В. (1986) *Миграция химических веществ в сопряженных экосистемах конечно-моренных ландшафтов Валдая. Структура и функционирование экосистем южной тайги*. М.: Наука, с. 134-150
- Труды национального парка "Валдайский". (2010) 1. СПб.: ФГУ "Национальный парк "Валдайский"" 430 с.
- Фотиев А.В., Фотиева В.Н. (1974) Связь органического вещества с минеральным в болотных водах. *Биология внутренних вод. Информ. бюл.* **21**, 15-23.
- Хаустов А.П. (2016) Геохимические барьеры с позиций синергетики. *Геохимия ландшафтов (к 100-летию А.И. Перельмана). Доклады Всероссийской научной конференции. Москва, 18-20 октября 2016 г.* М.: Географический факультет МГУ, 64-67.
- Экология и продуктивность лесов Нечерноземья (на примере Валдая). (1980) М.: Изд-во Московского университета, 243 с.
- Dugmore A.J., Newton A.J., Sugden D.E., Larsen G. (1992) Geochemical stability of fine-grained silicic Holocene tephra in Iceland and Scotland. *Quaternary Sci.* (7), 173-183.
- Piina S.M., Lapitskiy S.A., Alekhin Y.V., Viers J., Benedetti M., Pokrovsky O.S. (2016). Speciation, size fractionation and transport of trace elements in the continuum soil water – mire – humic lake – river – large oligotrophic lake of a subarctic watershed. *Aquat. Geochem.* **22**(1), 65-95.
- Frolking S., Roulet N.T., Tuittila E., Bubier J.L., Quillet A., Talbot J., and Richard P.J.H. (2010) A new model of Holocene peatland net primary production, decomposition, water balance, and peat accumulation. *Earth Syst. Dynam.* **1**, 1-21, / [www.earth-syst-dynam.net/1/1/2010/](http://www.earth-syst-dynam.net/1/1/2010/)
- Malawska M., Wiłkomirski B. (2004) Geochemistry and geochemical differentiation on major elements in selected peat bog profiles (south-east Poland). *Soil Sci. Plant Nutr.* **50**(6), 925-930.
- Orru H., Orru M. (2006) Sources and distribution of trace elements in Estonian peat. *Global Planet. Change.* **53**(4), 249-258.
- Pokrovsky O.S., Dupre B., Schott J. (2005) Fe-Al-organic colloids control of trace elements in peat soil solutions: results of ultrafiltration and dialysis. *Aquat. Geochem.* **11**, 241-278.
- Steinmann P., Shotyk W. (1997) Geochemistry, mineralogy, and geochemical mass balance on major elements in two peat bog profiles (Jura Mountains, Switzerland). *Chem. Geol.* **138**, 25-53.