ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 550.46

ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ
ОЛИГОТРОФНЫХ БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМ

© 2016 г. О.Г. Савичев¹, А.К. Мазуров¹, И.П. Семилетов¹, В.А. Базанов²,
Н.В. Гусева¹, А.А. Хвашевская¹, Н.Г. Наливайко¹

¹Томский политехнический университет, Томск, Россия

²Томский государственный университет, Томск, Россия

e-mail: osavichev@mail.ru, AKM@tpu.ru, IgorSm@iarc.uaf.edu, ingeotech@mail.ru,
Guseva24@yandex.ru, unpc_vada@mail.ru, unpc_voda@mail.ru

Поступила в редакцию 03.11.2015 г.

На основе анализа геоботанических, гидрогеохимических и микробиологических наблюдений в 2002–2015 гг. на восточном участке Васюганского болотного комплекса (Западная Сибирь) предложена гипотеза формирования выпуклого рельефа олиготрофных болотных экосистем в результате приспособления системы “сосна – кустарники – сфагновые мхи” к гидрологическим и гидрогеохимическим условиям и взаимного влияния биотических и абиотических компонентов. Сосна формирует “фундамент” экосистемы, кустарники – “армирующий слой”, а сфагновые мхи выступают в двойственной роли “наполнителя” экосистемы и “стимулятора” вертикального прироста поверхности. Олиготрофная болотная экосистема неравновесна и непрерывно изменяется в зависимости от гидрогеохимических условий, которые регулируют количество доступных биогенных элементов (прежде всего – соединения Са и Р), кислородный режим торфяной залежи, выведение или трансформация токсичных продуктов биогеохимических и биохимических процессов (например, Al и NO₂). Концентрирование токсичных веществ во многом зависит от функционирования окислительного и восстановительного геохимических барьеров, которые, в свою очередь, связаны с водным режимом болота и свойствами болотной растительности.

Ключевые слова: гидрогеохимические условия, болотные экосистемы, болотные процессы, олиготрофные болота, Западная Сибирь.

Введение. Значительная часть территории Западной Сибири занята торфяными болотами, причем ее центральная часть, соответствующая бассейну реки Обь на участке ее среднего течения, покрыта выпуклыми олиготрофными болотами. Их отличительной чертой является не просто заполнение депрессий органическим материалам и продуктами его трансформации, а преобладание вертикального прироста торфяной залежи над действием силы тяжести. Вместе с тем подобные болотные экосистемы весьма разнообразны по сочетанию преобладающих фитоценозов и форм поверхности (рямы – сосново-сфагново-кустарниковые болота; грядово-мочажинные и грядово-мочажинно-озерковые комплексы), что до сих пор не нашло убедительного объяснения, подтвержденного анализом количественных геоботанических, геохимических и иных показателей.

С учетом этого авторами в течение ряда лет совместно с С.Л. Шварцевым, А.А. Скугаревым

и другими проводятся исследования болот Западной Сибири. В результате их выполнения ранее была получена обобщенная характеристика химического состава вод по типам и подтипам торфяной залежи и приуроченности к водоразделам и долинам в таежной зоне Западной Сибири, выявлены общие закономерности распределения гидрогеохимических показателей по территории болот, рассмотрены некоторые вопросы изменения химического состава болотных вод по глубине торфяной залежи, по сезонам гидрологического года и за последние 1.5–2 десятилетия [8, 14, 17, 21]. Целью рассматриваемой работы является более детальное изучение гидрогеохимических условий в олиготрофных болотных экосистемах.

Исходная информация и методика исследования. В качестве объекта исследования выбран восточный участок Васюганского болота, соответствующий водосбору реки Ключ – элементу речной системы “Ключ – Бакчар – Чая – Обь” (рис. 1).

Детальное описание этого участка приведено в [4]. Наиболее важной особенностью распределения экосистем на его территории является последовательная смена в направлении от реки к границе водосбора темновой лес (на приречном участке), притеррасного евтрофного болота, березового леса, заболоченного смешанного леса, мезотрофного болота, олиготрофного сосново-сфагново-кустарничкового болота (ряма), грядово-мочажинного (ГМК) и грядово-мочажинно-озеркового (ГМОК) комплексов [12]. Анализ модели месячного водного баланса водосбора р. Ключ показал, что на границе ГМОК и ряма, с одной стороны, и ряма и мезотрофного болот, с другой, наблюдается относительно резкое уменьшение слоя стока, что свидетельствует о потенциальном переувлажнении пограничных участков. В свою очередь, это приводит не только к увеличению площади всего болотного комплекса, но также к трансформации внутриболотных экосистем в рассматриваемом водосборе и изменению их границ и площади распространения [10].

В пределах мезотрофного болота, олиготрофных ряма, ГМК и ГМОК, а также открытых топяных участках в течение 2002–2015 гг. проводился отбор проб болотных вод из деятельного горизонта торфяной залежи в верхней части водосбора на границе с водосбором реки Гавриловка (элемент речной системы “Гавриловка – Икса – Чая – Обь”). Большая часть проб отобрана на участках ряма и мезотрофного болота. В 2003, 2014, 2015 гг. проводился отбор проб по профилям от мезотрофного болота до ГМОК, а 4 апреля 2015 г. (конец зимней межени, толщина снежного покрова до 0.85 м) дополнительно – отбор проб воды в ряме, мочажине и гряде ГМК с нижней границы деятельного горизонта и с глубины 1 м, а также отбор проб торфа по интервалам 0.0–0.1, 0.1–0.2, 0.2–0.3, 0.3–0.4, 0.4–0.5, 0.5–0.6, 0.6–0.7, 0.7–0.8, 0.8–0.9, 0.9–1.0 м. Глубина торфяной залежи в пределах мезотрофного болота – 1.5–2 м, ряма – 3 м, в ГМК – 4.0–4.2 м.

Лабораторные работы выполнялись в аккредитованных лабораториях Томского политехнического университета (ТПУ; 2002–2015 гг.) и АО “Томскгеомониторинг” (2002–2006 гг.) с использованием одинаковых методов анализа содержания в болотных водах главных ионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-), CO_2 , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , Si, Fe, Mn, Al, Cu, Zn, Cd, Pb, бихроматной и перманганатной окисляемости и pH. При определении гидрогеохимических показателей болотных вод использовались следующие методы: pH – потенциометрический; SO_4^{2-} – турбидиметрический; Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , Cl^- , бихроматная окисляемость (БО), перманганатная окисляемость (ПО), CO_2 –

Рис. 1. Схема размещения участков исследования (1) и основной части Васюганского болота (2).

титриметрический; NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , Si – фотометрический; Al – флуориметрический; Na^+ , K^+ , Fe – атомно-абсорбционный; Zn, Pb, Cd, Cu, Mn – атомно-абсорбционный и инверсионно-вольтамперометрический. Состав водных вытяжек из торфов определялся в ТПУ методом ионной хроматографии по аттестованным методикам.

Для объяснения полученных результатов проводились расчеты индекса насыщения L с использованием программного комплекса Solution+ [9], разработанного на основе метода констант и определения коэффициентов активности по уравнению Дэвиса:

$$L = \lg PA - \lg K_{\text{нр}}, \quad (1)$$

где PA – произведение активностей группы веществ; $K_{\text{нр}}$ – константа неустойчивости. Отрицательные значения L указывают на потенциальное недосыщение, а положительные – на пересыщение раствора относительно рассматриваемых минералов.

Результаты исследования и их обсуждение. Ранее выполненные исследования болот таежной зоны Западной Сибири [8], показали, что, во-первых, болотные воды олиго- и мезотрофных болот, в среднем, пресные с малой и очень малой минерализацией, гидрокарбонатные кальциевые, по величине pH – кислые, а воды евтрофных болот – пресные со средней и повышенной минерализацией, в основном гидрокарбонатные кальциевые, слабокислые. Воды всех типов болот содержат большое количество органических веществ природного происхождения, в составе которых выявлены фульвокислоты (ФК), гуминовые кислоты (ГК), фенолы, ароматические и парафиновые углеводороды, карбоновые кислоты и ряд других

соединений [13, 20]. В достаточно больших количествах в болотных водах содержатся продукты трансформации органических веществ (например, ионы аммония) и соединения ряда металлов с органическими кислотами. Во-вторых, в пределах таежной зоны Западной Сибири по мере увеличения модулей водного стока и доли верховых болот в заболоченности водосборов происходит общее уменьшение содержаний растворенных солей с юга – юго-запада на север – северо-восток, а в пределах этого фона наблюдается увеличение концентраций большинства изученных веществ: 1) от водоразделов к долинам; 2) на участках с преобладающей лесо-топяной торфяной залежью по сравнению с лесной и топяной [8].

В развитие этих выводов нами был выполнен анализ данных о химическом составе вод деятельного горизонта торфяной залежи в пределах рассматриваемого олиготрофного участка Васюганского болота в ряду “рям – топяные участки – грядово-мочажинный и грядово-мочажинно-озерковый комплексы”. В результате установлено, что наименьшее суммарное содержание главных ионов $\Sigma_{гн}$ характерно для топей – переувлажненных участков болота с травяной и моховой растительностью, для которых, согласно [3], средняя многолетняя проточность (удельный расход воды в деятельном горизонте на единицу длины контура стекания) составляет 11–15 л/(с · км). Содержания растворенных солей в водах ряма, гряды и мочажины ГМК примерно сопоставимы (средняя проточность в ряме примерно 0.5–2 л/(с · км), в ГМК – 1.5–6 л/(с · км)). Но при этом нельзя не отметить, что величина $\Sigma_{гн}$ в ряме больше, чем в мочажине, но меньше, чем в гряде ГМК (табл. 1, 2).

Подобное распределение вполне согласуется с известным выводом об обратной зависимости между интенсивностью водообмена и содержанием растворенных солей, полученным ранее для речных и подземных вод [11, 16, 19]. Ее смысл в общих чертах заключается в связи между величиной водного стока и временем взаимодействия воды с частицами породы и органическим веществом, регулирующим, в свою очередь, набор определенных химических реакций и физико-химических процессов (с учетом скорости их протекания) и условия на поверхности взаимодействующих сред [5, 15, 19].

Из других наиболее значимых проявлений этой зависимости применительно к рассматриваемому олиготрофному болотному комплексу можно отметить последовательное уменьшение pH, концентраций фосфатов и увеличение содержания растворенного углекислого газа в болотных

водах деятельного горизонта в ряду “топь – мочажина ГМК – гряда ГМК – рям” (табл. 1, 2). Этот факт свидетельствует об определенном изменении гидрогеохимических условий произрастания растительности по мере переувлажнения внутриболотных экосистем, причем в сторону их “ужесточения”, когда становится практически невозможным существование древесной и кустарниковой растительности.

Можно предположить, что роль последней заключается в формировании каркаса олиготрофных экосистем гряд ГМК и, особенно, ряма. При этом сосна формирует “фундамент” экосистемы, а кустарники – “армирующий” слой. Вклад сфагновых мхов в развитие выпуклой формы олиготрофного болота весьма двойственный. С одной стороны, моховой покров – это “заполнитель”, а с другой – фактор, ограничивающий жизнедеятельность древесной растительности за счет постепенного ухудшения кислородного питания в корневом слое и накопления токсичных продуктов жизнедеятельности биоты и трансформации торфа.

Для подтверждения этой гипотезы нами в сентябре 2014 г. (осенняя межень) и апреле 2015 г. (зимняя межень) были отобраны пробы болотных вод в ряме и ГМК из нижней части деятельного горизонта и на глубине 1.0–1.2 м. Анализ химического и микробиологического состава болотных вод в целом подтвердил выводы об увеличении суммарного содержания растворенных солей в инертном слое торфяной залежи по сравнению с деятельным горизонтом и наличии слоев с резким изменением концентраций целого ряда веществ в воде и торфах на верхней и нижней границе инертного горизонта, ранее изложенные в [1, 2, 8, 17, 18].

Дополнительно выявлены особенности распределения некоторых веществ и микроорганизмов в болотных водах в зависимости от рельефа и глубины торфяной залежи. В частности, наибольшие концентрации Al и NO_2^- в пределах ГМК отмечены в гряде на глубине 1.0–1.2 м и в мочажине в деятельном горизонте (табл. 3). Оба вещества могут оказывать негативное влияние на состояние биологических объектов [7], что согласуется распределением нитрифицирующих (в гряде) и денитрифицирующих (в мочажине) бактерий и в целом подтверждает высказанную выше гипотезу. При этом необходимо отметить, что концентрации NO_2^- в водных вытяжках из торфа по глубине торфяной залежи в гряде ГМК заметно возрастают в слое 0.7–0.9 м. С учетом столь же резкого увеличения концентраций NH_4^+ , это указывает на восстанови-

Таблица 1. Статистические характеристики химического состава вод олиготрофных болотных экосистем за период 2002–2015 гг.

Показатель	Единицы измерения	Рям		Гряды ГМК		Мочажина ГМК		Топь	
		A	σ	N	A	σ	N	A	σ
pH	Ед. pH	4.91	0.70	14	4.51	0.84	7	4.47	0.40
CO ₂	мг/дм ³	40.6	12.6	9	42.5	14.8	5	55.2	29.9
Сумма главных ионов $\Sigma_{гп}$	мг/дм ³	38.1	19.9	14	45.0	15.1	7	32.1	7.5
Ca ²⁺	мг/дм ³	8.1	5.7	14	7.1	3.9	7	13.2	2.6
Mg ²⁺	мг/дм ³	2.1	2.8	14	3.0	3.3	7	3.7	1.1
Na ⁺	мг/дм ³	2.1	1.6	11	5.0	6.1	6	1.5	1.3
K ⁺	мг/дм ³	0.8	0.3	11	1.1	0.7	6	0.6	0.3
HCO ₃ ⁻	мг/дм ³	14.8	15.6	14	15.5	11.9	7	7.9	0.3
Cl ⁻	мг/дм ³	3.8	2.6	14	10.1	10.2	7	2.7	1.1
SO ₄ ²⁻	мг/дм ³	6.2	8.2	14	4.2	10.1	7	3.2	5.5
NO ₃ ⁻	мг/дм ³	1.713	2.749	11	0.803	1.065	4	0.756	0.772
NO ₂ ⁻	мг/дм ³	0.057	0.057	11	0.039	0.039	4	0.051	0.009
NH ₄ ⁺	мг/дм ³	2.539	2.924	14	2.413	2.861	7	2.152	3.117
PO ₄ ³⁻	мг/дм ³	0.656	0.971	9	0.330	0.290	4	0.251	0.103
Si	мг/дм ³	4.01	3.49	11	3.10	1.97	4	2.45	3.04
Fe	мг/дм ³	1.672	1.125	10	0.912	0.654	5	1.403	0.955
Al	мкг/дм ³	640.9	350.0	7	1021.0	260.9	3	1122.0	247.2
Mn	мкг/дм ³	138.6	93.5	7	99.0	56.5	3	97.3	60.8
Cu	мкг/дм ³	7.4	8.4	11	4.8	3.0	3	3.2	4.4
Zn	мкг/дм ³	29.8	18.4	11	129.3	70.7	3	31.0	45.9
Cd	мкг/дм ³	0.13	0.31	10	0.13	0.11	3	0.05	0.08
Pb	мкг/дм ³	5.0	10.6	10	1.5	1.4	3	2.4	0.9
ПО	мгО/дм ³	86.10	25.78	8	102.88	24.88	3	98.86	25.83
БО	мгО/дм ³	153.72	45.95	9	180.37	33.54	3	215.00	53.40

Примечание: A – среднее арифметическое; σ – среднее квадратическое отклонение; N – объем выборки; “рям” – сосново-сфагново-кустарничковое болото; ГМК – грядово-мочажинный комплекс.

Таблица 2. Результаты проверки на однородность с использованием критериев Стьюдента (t) и Фишера (F) при уровне значимости 5%

Показатель	Отношение фактического и критического значения критерия Стьюдента $t/t_{5\%}$						Отношение фактического и критического значения критерия Фишера $F/F_{5\%}$					
	Рям	рям	рям	рям	м-ГМК	г-ГМК	рям	рям	рям	м-ГМК	г-ГМК	г-ГМК
Выборка 1	м-ГМК	г-ГМК	топь	топь	топь	топь	м-ГМК	г-ГМК	топь	топь	топь	топь
Выборка 2	м-ГМК	г-ГМК	топь	топь	топь	топь	м-ГМК	г-ГМК	топь	топь	топь	топь
pH	0.61	0.53	1.89	0.04	0.85	0.81	0.18	0.27	0.89	0.28	0.65	1.13
CO ₂	0.64	0.11	0.84	0.38	0.12	0.55	0.05	0.15	1.53	0.14	0.54	0.96
$\Sigma_{\text{гип}}$	0.32	0.37	1.89	0.75	1.98	2.73	0.62	0.32	2.06	0.39	0.43	1.04
Ca ²⁺	0.79	0.20	1.21	0.87	2.01	1.08	0.20	0.39	1.44	0.45	1.54	0.60
Mg ²⁺	0.59	0.30	0.39	0.20	1.44	0.69	0.30	0.26	1.85	0.46	0.80	2.29
Na ⁺	0.29	0.65	0.84	0.44	0.26	0.96	0.07	2.29	0.44	2.04	0.32	5.84
K ⁺	0.33	0.60	1.46	0.47	0.46	1.34	0.22	0.94	0.29	0.25	0.70	1.57
HCO ³⁻	0.48	0.04	1.37	0.62	2.48	1.81	2.42	0.32	>50	1.54	>50	>50
Cl ⁻	0.38	1.00	0.72	0.73	0.12	1.15	0.21	2.84	1.76	3.43	1.09	23.23
SO ₄ ²⁻	0.38	0.22	0.51	0.10	0.01	0.14	0.52	0.28	0.65	0.84	0.37	0.86
NO ₃ ⁻	0.37	0.28	0.12	0.03	0.90	0.62	2.67	0.46	3.60	0.18	0.34	0.41
NO ₂ ⁻	0.11	0.25	1.40	0.18	1.70	1.20	0.33	0.15	11.31	0.07	4.45	3.91
NH ⁴⁺	0.12	0.04	1.53	0.07	1.22	1.26	0.18	0.20	0.34	0.21	0.26	0.31
PO ₄ ³⁻	0.43	0.28	0.79	0.16	0.57	0.87	1.50	0.77	21.55	0.07	1.95	1.55
Si	0.40	0.21	0.16	0.18	0.59	0.37	0.30	0.22	0.35	0.08	0.45	0.50
Fe (общ)	0.23	0.60	0.87	0.49	1.14	1.52	0.41	0.33	0.39	0.11	0.49	0.50
Al	0.57	0.66	0.60	0.07	0.99	1.40	0.10	0.05	0.39	0.18	1.17	0.17
Mn	0.27	0.26	0.17	0.01	0.04	0.04	0.06	0.07	0.00	0.03	0.00	0.00
Cu	0.54	0.22	0.26	0.45	0.23	0.05	8.04	0.20	0.09	0.17	0.38	0.06
Zn	0.06	1.78	0.61	1.19	0.42	0.45	0.15	0.38	0.16	0.38	0.16	0.06
Cd	0.20	0.01	0.20	0.32	0.02	0.31	0.98	0.19	0.37	0.13	0.07	0.05
Pb	0.20	0.23	0.27	0.13	0.20	0.14	0.53	1.53	3.35	0.20	0.44	0.06
ПО	0.37	0.39	0.23	0.09	0.59	0.58	0.19	0.03	0.25	0.07	0.58	0.20
БО	0.32	0.38	0.15	0.09	0.27	0.24	3.01	0.05	0.30	1.29	3.96	0.42

Примечание: м-ГМК – мочажина грядово-мочажинного комплекса; г-ГМК – гряда грядово-мочажинного комплекса; полужирным шрифтом выделены случаи с нарушением однородности.

Рис. 2. Распределение концентраций NH_4^+ и NO_2^- в водной вытяжке из торфа по глубине торфяной залежи в гряде ГМК.

тельную обстановку и дефицит кислорода на глубинах более 0.5 м (рис. 2).

Еще одна особенность гидрогеохимических условий в исследуемых экосистемах заключается в противоположно направленных тенденциях изменения по глубине торфяной залежи концентраций главных ионов в болотных (гравитационных) водах и водных вытяжках из торфа. В последнем случае максимумы суммы главных ионов наблюдаются в слое 0.0–0.2 м (рис. 3). На глубине 0.3–0.4 м, соответствующей среднему уровню болотных вод, происходит существенное уменьшение величины $\Sigma_{\text{гн}}$ (более чем на 700 мг/дм³) и последующая определенная стабилизация в диапазоне 780–1100 мг/дм³ за исключением резкого уменьшения значений в слое 0.7–0.8 м до 325.2 мг/дм³.

Подобное распределение содержаний растворенных солей объясняется сочетанием целого ряда причин, главными среди которых, предположительно, являются: 1) выведение из раствора малорастворимых соединений металлов (включая кальций) с органическими кислотами и их последующее осаждение: 1.1) в интервале глубин, соответствующих колебаниям среднесезонных уровней болотных вод; 1.2) на границе устойчивого снижения фильтрационных свойств торфа и смены окислительной обстановки на восстановительную; 2) сорбционные и ионно-обменные процессы вблизи слоя устойчивого снижения фильтрационных свойств торфа и смены окислительной обстановки на восстановительную; 3) поглощение растительностью минеральных солей и некоторых

Рис. 3. Распределение суммы главных ионов (I), концентраций Ca^{2+} (II) и HCO_3^- (III) в водной вытяжке из торфа по глубине торфяной залежи в гряде ГМК.

продуктов трансформации органического вещества в вегетационный период.

Первое и второе утверждения основаны на анализе результатов моделирования геомиграции в торфяной залежи [17], расчета индексов насыщения болотных вод относительно соединений кальция и магния с гуминовыми кислотами (табл. 4; пересыщение болотных вод относительно Ca ГК и Mg ГК) и водных вытяжек из торфа относительно оксалата кальция (рис. 4; пересыщение водных вытяжек относительно оксалата кальция), третье — на анализе внутригодового изменения гидрогеохимических показателей. В частности, установлено, что в зимнюю межень (гидрологиче-

Рис. 4. Распределение концентраций $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ в водной вытяжке из торфа и индекса насыщения L (водной вытяжки) по глубине торфяной залежи в гряде ГМК.

Таблица 3. Физико-химические и геохимические показатели вод исследуемого участка Васюганского болота в 2014–2015 гг.

Пункт	Единицы измерения	Рям (24.09.14)		Рям (07.04.15)		ГМК, мочажина (07.04.15)		ГМК, гряда (07.04.15)	
		0.3–0.5	1.0–1.2	0.3–0.5	1.0–1.2	0.3–0.5	1.0–1.2	0.3–0.5	1.0–1.2
Глубина отбора	м								
pH	ед. pH	4.64	5.53	5.20	5.40	5.40	5.00	5.40	5.50
CO ₂	мг/дм ³	30.8	35.2	39.0	35.0	35.0	62.0	53.0	44.0
Σ _{гн}	мг/дм ³	11.6	32.4	32.5	46.7	33.1	44.3	34.4	38.7
Ca ²⁺	мг/дм ³	6.9	11.3	12.0	17.0	11.0	16.0	10.8	12.0
Mg ²⁺	мг/дм ³	1.1	1.8	2.2	3.2	3.0	3.5	2.7	3.1
Na ⁺	мг/дм ³	0.3	1.4	1.7	2.3	1.5	3.6	1.4	2.1
K ⁺	мг/дм ³	0.7	0.4	0.8	0.8	0.8	1.2	1.0	1.1
HCO ₃ ⁻	мг/дм ³	2.0	14.6	9.7	15.0	13.4	8.5	16.0	16.0
Cl ⁻	мг/дм ³	0.6	1.4	2.7	3.8	2.7	7.0	1.8	3.0
SO ₄ ²⁻	мг/дм ³	0.1	1.5	3.4	4.6	0.7	4.5	0.7	1.4
NO ₃ ⁻	мг/дм ³	0.003	0.001	0.66	0.77	0.29	0.005	0.25	0.31
NO ₂ ⁻	мг/дм ³	0.002	0.001	0.067	0.092	0.109	0.001	0.001	0.093
NH ₄ ⁺	мг/дм ³	0.12	0.016	0.11	0.18	0.15	0.82	0.14	0.32
Азот NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , NH ₄ ⁺	мг/дм ³	0.094	0.013	0.255	0.342	0.215	0.638	0.165	0.347
PO ₄ ³⁻	мг/дм ³	–	–	0.44	0.86	0.67	0.61	0.73	0.21
F ⁻	мг/дм ³	0.04	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.04
Si	мг/дм ³	3.80	13.23	3.73	3.96	4.09	5.18	4.71	4.87
Fe	мг/дм ³	1.42	2.07	0.57	0.7	1.1	0.73	1.2	0.73
Al	мкг/дм ³	–	–	751	615	1904	820	724	1213
Mn	мкг/дм ³	–	–	87	160	160	38	100	42
Cu	мкг/дм ³	4.6	4.6	5.0	4.6	3.7	2.6	3.0	3.2
Zn	мкг/дм ³	22.0	28.0	25.0	33.0	44.0	26.0	210.0	78.0
Cd	мкг/дм ³	0.08	0.07	0.00	0.08	0.10	0.05	0.18	0.21
Pb	мкг/дм ³	2.0	2.0	0.8	2.4	8.1	1.6	2.7	1.8
ПО	мгО/дм ³	79.20	107.00	113.60	96.80	104.00	111.20	124.80	108.00
БО	мгО/дм ³	151.00	204.00	171.60	185.30	191.70	198.50	212.00	183.90
Бактерии:									
сапрофиты мезофильные	кл/мл	–	–	–	–	1370	–	19200	30
сапрофиты психрофильные	кл/мл	31090	–	–	–	15800	–	7080	310
олиготрофные	кл/мл	64200	–	–	–	396220	–	251300	34600
азотфиксирующие	кл/мл	–	–	–	–	870	–	8720	6410
аммонифицирующие	кл/мл	100	–	–	–	100	–	100	0
нитрифицирующие	кл/мл	–	–	–	–	100	–	1000	1000
денитрифицирующие	кл/мл	10	–	–	–	10	–	0	0
целлюлозоразрушающие	кл/мл	–	–	–	–	0	–	10	0
аэробные									
целлюлозоразрушающие	кл/мл	–	–	–	–	1000	–	1000	1000
анаэробные									
нефтеокисляющие	кл/мл	1200	–	–	–	300	–	60	0
нефтолерантные	кл/мл	–	–	–	–	37000	–	5300	7950
бензолокисляющие	усл. ед.	–	–	–	–	0	–	0	0
фенолокисляющие	усл. ед.	–	–	–	–	230	–	290	400
гетеротрофные	кл/мл	–	–	–	–	14510	–	4020	6150
железоокисляющие, образующие гидроокись железа									
гетеротрофные	кл/мл	–	–	–	–	360	–	2440	10200
железоусваивающие									
марганцеокисляющие	кл/мл	–	–	–	–	0	–	9800	2290
сульфатовосстанавливающие	кл/мл	–	–	–	–	0	–	0	0
Thiobacillus thioarus	кл/мл	–	–	–	–	530	–	250	260
Thiobacillus intermedius	кл/мл	–	–	–	–	230	–	0	20
Thiobacillus novellus	кл/мл	–	–	–	–	300	–	820	2200

Примечание: 24.09.2014 г. в деятельном горизонте ряма на глубине 0.3–0.5 м суммарное содержание железобактерий составило 23200 кл/мл, а тионовых – 720 кл/мл.

Таблица 4. Индекс насыщения L болотных вод относительно ряда минералов и органоминеральных соединений

Формула	Рям (24.09.14)		Рям (07.09.15)		ГМК, мочажина (07.09.15)		ГМК, гряда (07.09.15)	
	0.3–0.5	1.0–1.2	0.3–0.5	1.0–1.2	0.3–0.5	1.0–1.2	0.3–0.5	1.0–1.2
Глубина отбора, м								
$\text{CaCO}_3(\text{кальцит}) = \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	–5.78	–9.20	–9.21	–9.11	–9.12	–9.16	–9.26	–9.12
$\text{CaCO}_3(\text{кальцит}) + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}^{2+} + 2 \times \text{HCO}_3^-$	–5.37	–3.52	–3.85	–3.29	–3.56	–4.06	–3.60	–3.48
$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2(\text{доломит}) = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 2 \times \text{CO}_3^{2-}$	–11.33	–18.17	–18.13	–17.92	–17.78	–17.96	–18.10	–17.81
$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2(\text{доломит}) + 2 \times \text{CO}_2 + 2 \times \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 4 \times \text{HCO}_3^-$	–10.49	–6.81	–7.41	–6.28	–6.67	–7.76	–6.78	–6.52
$\text{Ca ГК} = \text{Ca}^{2+} + \text{ГК}$	0.17	0.34	0.39	0.54	0.35	0.51	0.35	0.39
$\text{Mg ГК} = \text{Mg}^{2+} + \text{ГК}$	0.10	0.26	0.38	0.53	0.51	0.57	0.46	0.52
$\text{SiO}_2(\text{кварц}) + 2 \times \text{H}_2\text{O} = \text{H}_4\text{SiO}_4^0$	0.20	0.74	0.19	0.22	0.23	0.34	0.29	0.31
$3 \times \text{KAlSi}_3\text{O}_8(\text{ортоклаз}) + 2 \times \text{H}^+ + 12 \times \text{H}_2\text{O} = \text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}\text{OH}_2(\text{мусковит}) + 2 \times \text{K}^+ + 6 \times \text{H}_4\text{SiO}_4^0$	–30.07	–25.52	–28.90	–28.25	–28.22	–28.04	–27.69	–27.30
$2 \times \text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}\text{OH}_2(\text{мусковит}) + 2 \times \text{H}^+ + 3 \times \text{H}_2\text{O} = 3 \times \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \times 2 \times \text{H}_2\text{O}(\text{каолинит}) + 2 \times \text{K}^+$	–6.86	–5.56	–5.64	–5.14	–5.20	–5.64	–5.03	–4.74
$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8(\text{анортит}) + 2 \times \text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} = \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \times 2 \times \text{H}_2\text{O}(\text{каолинит}) + \text{Ca}^{2+}$	–33.05	–29.48	–30.22	–29.01	–29.56	–31.05	–29.99	–29.58
$2 \times \text{NaAlSi}_3\text{O}_8(\text{альбит}) + 11 \times \text{H}_2\text{O} + 2 \times \text{CO}_2 = \text{AlSi}_2\text{O}_7 \times 2 \times \text{H}_2\text{O}(\text{каолинит}) + 2 \times \text{Na}^+ + 2 \times \text{HCO}_3^- + 4 \times \text{H}_4\text{SiO}_4^0$	–18.63	–13.59	–16.01	–15.18	–15.58	–15.32	–15.61	–15.04
$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8(\text{альбит}) + 7 \times \text{H}_2\text{O} + \text{H}^+ = \text{Al}_2\text{O}_3 \times 3 \times \text{H}_2\text{O}(\text{гипсбит}) + \text{Na}^+ + 3 \times \text{H}_4\text{SiO}_4^0$	–208.7	–205.6	–207.4	–207.0	–207.2	–206.9	–207.0	–206.7

ского года) суммарное содержание растворенных солей выше соответствующих значений не только в период весеннего половодья, но и в летне-осеннюю межень. Принимая во внимание, что контакт вод деятельного горизонта олиготрофного болота с грунтовыми (более минерализованными) водами максимально затруднен в течение всего года, а зимой (вследствие наличия снегового покрова) ограничен и приток веществ из атмосферы, в качестве ключевого фактора в изменении гидрогеохимических показателей целесообразно рассматривать преимущественно сезонные биогеохимические процессы, результатом которых является, например, поглощение растительностью соединений фосфора и кальция в летний период. Соответственно, в вегетационный период концентрации PO_4^{3-} и Ca^{2+} в среднем снижаются, а зимой – увеличиваются.

Обобщая все указанное выше, можно предположить, что формирование выпуклого рельефа олиготрофных болот является результатом: 1) приспособления системы “сосна – кустарники – сфагновые мхи” к гидрологическим и гидрогеохимическим условиям; 2) взаимного влияния биотических и абиотических компонентов олиготрофной болотной экосистемы. При отсутствии одного из этих компонентов выпуклый рельеф не формируется, а при избыточном преобладании – деградирует. Так, при осушении торфяного болота

происходит замещение болотной экосистемы на лесные, а при переувлажнении – формирование топей и внутриболотных водоемов. Но даже при неизменном водном балансе олиготрофного болотного комплекса в таежной зоне Западной Сибири непрерывно происходит трансформация внутриболотных экосистем в направлении: мезотрофное болото – рям; рям – ГМК, ГМК – ГМОК.

Скорость этой трансформации регулируется соотношением прироста биомассы и выноса продуктов разложения органического вещества и его взаимодействия с минеральными частицами: при преобладании первого процесса (прироста биомассы) формируется рям, а при преобладании второго (выноса продуктов разложения органических веществ) – ГМОК. Прирост биомассы определяется следующими условиями: 1) по своей сути это – дискретный процесс как во времени, так и в пространстве; 2) для прироста необходимы благоприятный кислородный режим, наличие питательных веществ (в данном случае – соединений фосфора и кальция), своевременное отведение токсичных продуктов (для рассматриваемого объекта – Al и NO_2^-), либо возможность вертикального смещения корнеобитаемого слоя (что обеспечивается заполнением сфагновыми мхами межкорневого пространства с последующей гибелью современной

древесной растительности и появлением нового прироста сосны).

Вынос продуктов биогеохимических и биохимических процессов в значительной степени зависит от интенсивности водообмена, наличия геохимических барьеров (например, согласно [5], окислительного барьера с осаждением соединений железа и марганца и восстановительного барьера с осаждением соединений ряда микроэлементов), возможности появления растений и микрофлоры, способных усваивать вещества, токсичные для других компонентов экосистемы.

Закключение. В развитие распространенной точки зрения об избыточном увлажнении и бедном водно-минеральном питании как необходимых условиях существования олиготрофных болот [6] предложена гипотеза формирования выпуклого рельефа подобных экосистем в результате приспособления системы “сосна – кустарники – сфагновые мхи” к гидрологическим и гидрогеохимическим условиям и взаимного влияния биотических и абиотических компонентов олиготрофной болотной экосистемы. Сосна формирует ее “фундамент”, кустарники – “армирующий слой”, а сфагновые мхи выступают в двойственной роли “наполнителя” экосистемы и “стимулятора” вертикального прироста поверхности. Эта система неравновесна и непрерывно изменяется при: 1) избыточном увлажнении – в сторону формирования топей и внутриболотных водоемов; 2) недостаточном увлажнении – в сторону смены олиготрофных болотных экосистем на мезотрофные, а в случае осушения болот – вплоть до замещения болотных экосистем на лесные. Эти изменения, чаще всего, не являются однонаправленными.

Скорость трансформации болотных экосистем в значительной степени определяется гидрологическими и нелинейно с ними связанными гидрогеохимическими условиями, которые регулируют количество доступных биогенных элементов, выведение или утилизацию токсичных продуктов биогеохимических и биохимических процессов в торфяной залежи и ее кислородный режим. Ориентировочно к первым относятся соединения Са и Р, а ко вторым – Al и NO₂⁻. Концентрирование токсичных (для растительности) веществ в торфяной залежи во многом зависит от функционирования окислительного и восстановительного геохимических барьеров, которые, в свою очередь, связаны с водным режимом болота и свойствами болотной растительности.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (проект № 14.Z50.31.0012), Томского

политехнического университета (проект ВИУ_VAF_144_2014) и РФФИ (13-05-98045 р_сибирь_a).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арбузов С. И., Архипов В. С., Бернатонис В. К. Среднее содержание некоторых элементов-примесей в торфах юго-восточной части Западно-Сибирской плиты // Известия Томского политехнического университета. 2009. Т. 315. № 1. С. 44–48.
2. Бахнов В. К. Почвообразование. Взгляд в прошлое и настоящее. Биосферные аспекты. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 117 с.
3. Иванов К. Е. Водообмен в болотных ландшафтах. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 280 с.
4. Инишева Л. И., Дементьева Т. В., Головацкая Е. А., Порохина Е. В. Научно-исследовательский полигон “Васюганье”. Томск: ЦНТИ, 2003. 88 с.
5. Крайнов С. Р., Рыженко Б. Н., Швеиц В. М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. М.: Наука, 2004. 677 с.
6. Лисс О. Л., Абрамова Л. И., Аветов Н. А., Березина Н. А., Инишева Л. И., Курнишкова Т. В., Слукa З. А., Толпышева Т. Ю., Шведчикова Н. К. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение. Тула: Гриф и К°, 2001. 584 с.
7. Молчанова Я. П., Заика Е. А., Бабкина Э. И., Сурнин В. А. Гидрохимические показатели состояния окружающей среды. М.: ФОРМУМ, 2007. 192 с.
8. Савичев О. Г. Геохимические показатели болотных вод в таежной зоне Западной Сибири // Изв. РАН. Сер. геогр. 2015. № 4. С. 47–57.
9. Савичев О. Г., Колоколова О. В., Жуковская Е. А. Состав и равновесие донных отложений р. Томь с речными водами // Геоэкология. 2003. № 2. С. 108–119.
10. Савичев О. Г., Бернатонис П. В., Бернатонис В. К. Гидрологическое обоснование хозяйственного освоения торфяных болот (на примере водосбора реки Ключ, Западная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 320. № 1. С. 155–162.
11. Фадеев В. В., Тарасов М. Н., Павелко В. Л. Зависимость минерализации и ионного состава воды рек от их водного режима. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 172 с.
12. Храмов А. А., Валуцкий В. И. Лесные и болотные фитоценозы Восточного васюганья (структура и биологическая продуктивность). Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1977. 221 с.
13. Шварцев С. Л., Рассказов Н. М., Сидоренко Т. Н., Здвижков М. А. Геохимия природных вод района большого Васюганского болота // Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития. Томск: ИОА СО РАН, 2002, С. 139–149.

14. Bazanov V.A., Berezin A.E., Savichev O.G., and Skugarev A.A. The phytoindication method for mapping peatlands in the taiga zone of the West-Siberian Plain // *International Journal of Environmental Studies*. 2009. Vol. 66. No. 4. P. 473–484.
15. Lasaga A.C. Fundamental approaches in describing mineral dissolution and precipitation rates // *Reviews in Mineralogy. Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals* / Mineralogical Society of America. 1995. Vol. 31. P. 23–86.
16. Lerman A. *Geochemical Processes Water and Sediment Environments*. New York: Wiley – Interscience Public, 1979. 481 p.
17. Savichev O.G. Distribution of Inorganic Pollutants over the Depth of Upper Peat Deposit // *Contemporary Problems of Ecology*. 2015. Vol. 8. No. 1. P. 118–124.
18. Savicheva O.G. and Inisheva L.I. Biochemical Activity of the Peat Soil of a River Marsh Ecosystem // *Contemporary Problems of Ecology*. 2008. Vol. 1. No. 6. P. 667–673.
19. Shvartsev S.L. Geochemistry of Fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth // *Geochemistry International*. 2008. Vol. 46. No. 13. P. 1285–1398.
20. Shvartsev S.L., Serebrennikova O.V., Zdvizhkov M.A., Savichev O.G., and Naimushina O.S. Geochemistry of wetland waters from the lower Tom basin, Southern Tomsk oblast // *Geochemistry International*. 2012. Vol. 50. No. 4. P. 367–380.
21. Zemtsov V.A. and Savichev O.G. Resources, regime and quality of surface waters in the Ob River basin: history, current state and problems of research // *International Journal of Environmental Studies*. 2015. No. 3. P. 1–11.

Hydrogeochemical Conditions of Formation Oligotrophic Bog Ecosystems

O.G. Savichev¹, A.K. Mazurov¹, I.P. Semiletov¹, V.A. Bazanov², N.V. Guseva¹,
A.A. Khvashchevskaya¹, and N.G. Nalivajko¹

¹Tomsk polytechnic university, Tomsk, Russia

²Tomsk State University, Tomsk, Russia

e-mail: osavichev@mail.ru, AKM@tpu.ru, IgorSm@iarc.uaf.edu, ingeotech@mail.ru,
Guseva24@yandex.ru, unpc_vada@mail.ru, unpc_voda@mail.ru

On the basis of the analysis of data of geobotanical, hydrogeochemical and microbiological observation during 2002–2015 years on east part of Vasyugan bog complex (Western Siberia) is offered a hypothesis of formation of a convex relief of oligotrophic bog ecosystems as a result of the adaptation of system “a pine – bushes – sphagnum mosses” to hydrological and hydrogeochemical conditions and mutual influence of biotic and abiotic components. The pine forms “base” of ecosystems, bushes – “a force layer”, and sphagnum mosses act in a dual role “filler” of ecosystem and “stimulator” of a vertical gain of a surface. Oligotrophic bog ecosystem is not equilibrium and continuously changes depending on hydrogeochemical conditions which adjust quantity of accessible biogenic elements (the first – connections of Ca and P), an oxygen regime of a peat deposit, deducing or transformation of toxic products of biogeochemical and biochemical processes (for example, Al and NO₂⁻). Concentration of toxic substances in many respects depends on functioning oxidizing and regenerative geochemical barriers, which, in turn, are connected with a water mode of a bog and properties of bog vegetation.

Keywords: hydrogeochemical conditions, bog ecosystems, bog processes, oligotrophic bogs, Western Siberia.

doi:10.15356/0373-2444-2016-5-60-69