

УДК 550.46

## ВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОД В ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ВАСЮГАНСКОГО БОЛОТА (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

Савичев Олег Геннадьевич<sup>1</sup>,  
OSavichev@mail.ru

Мазуров Алексей Карпович<sup>1</sup>,  
akm@tpu.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность работы.** Анализ изменений химического состава болотных вод является важной частью исследований изменений окружающей среды и климата при проведении экологического мониторинга при добыче нефти и газа, нормировании воздействий на водные объекты и оценке эффективности рекультивации загрязненных земель.

**Цель работы:** выявление закономерностей многолетних и внутригодовых изменений химического состава болотных вод деятельного горизонта торфяной залежи восточной части Васюганского болота.

**Методы исследования:** ландшафтно-геохимический и статистические методы, методы определения химического состава болотных вод, термодинамические расчеты.

**Результаты и выводы.** Выполнен анализ временных изменений химического состава вод восточного участка Васюганского болота (Западная Сибирь, бассейн реки Обь, Томская область) в пределах трёх внутриболотных экосистем (мезотрофной окраины, олиготрофного грядово-мочажинного комплекса и ряма – олиготрофного сосново-сфагново-кустарничкового болота). Показано, что в течение 2003–2017 гг. статистически значимые однонаправленные изменения химического состава болотных вод в деятельном горизонте торфяной залежи отсутствуют. Наблюдаемые колебания гидрохимических показателей обусловлены изменчивостью атмосферного увлажнения, которое в годовом разрезе периода 1965–2016 гг. остаётся статистически постоянным. Гидрохимический режим мезотрофной окраины отличается наибольшими изменчивостью минерализации болотных вод и зависимостью от величины атмосферного увлажнения, а гидрохимический режим ряма – наименьшим влиянием атмосферного увлажнения. Общими чертами гидрохимического режима всех трёх экосистем является определённое уменьшение минерализации в период весеннего половодья и увеличение соединений N, P, Si и микроэлементов в зимнюю межень.

### Ключевые слова:

Васюганское болото, болотные воды, химический состав, многолетние изменения, внутригодовые изменения.

### Введение

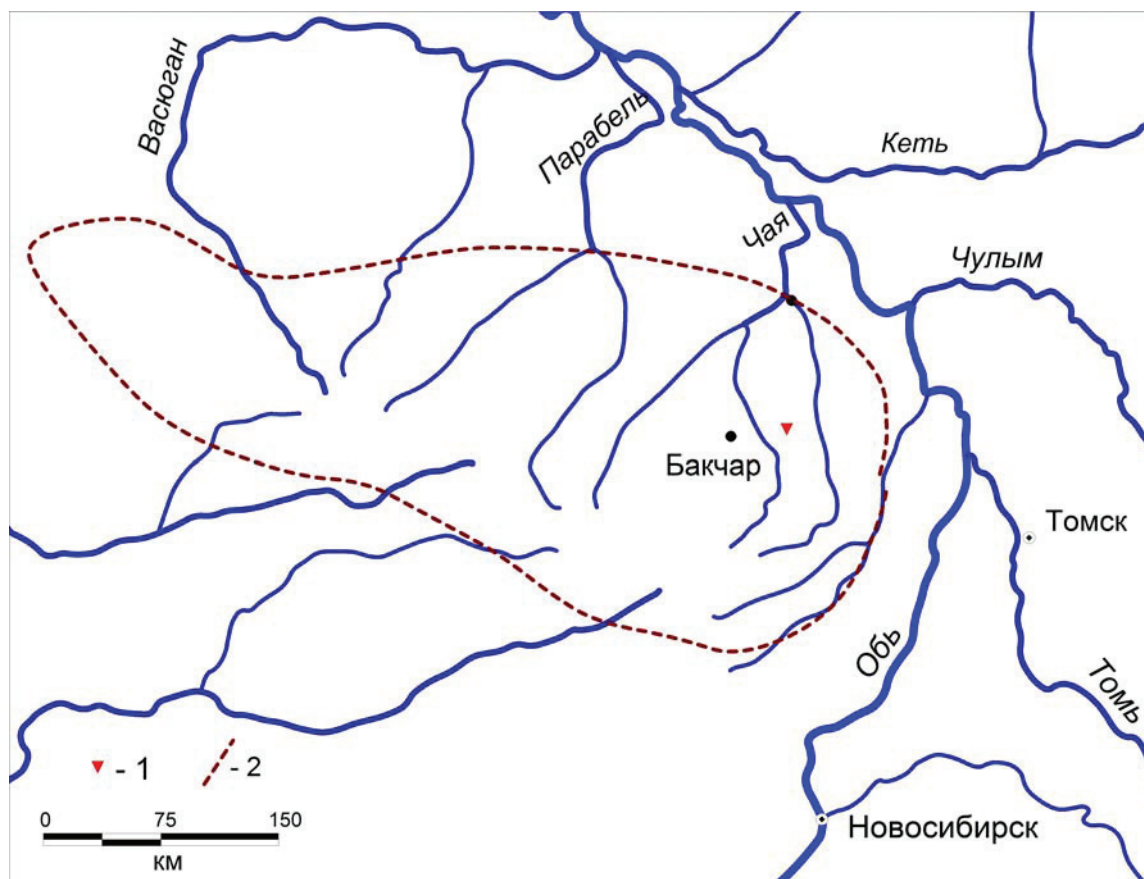
Васюганское болото – одно из самых больших в мире – расположено в Обь-Иртышском междуречье на площади не менее 52 тыс. км<sup>2</sup>, причём это значение следует рассматривать как приближённую оценку из-за сложной структуры болота и его продолжающегося расширения, сопровождающегося приростом торфяной залежи в среднем на 1 мм/год [1–3]. Васюганское болото играет очень важную роль в формировании условий жизнедеятельности населения и функционировании природно-территориальных комплексов Западной Сибири [4–6], что определяет актуальность комплексного исследования болота, в том числе и химического состава болотных вод, закономерностей его пространственно-временных изменений.

Ниже приведены результаты обобщения материалов исследований в рамках решения последней задачи, выполненных в течение 2003–2017 гг. в Томском политехническом университете (ТПУ) совместно с коллегами из Томского государственного университета (ТГУ), акционерного общества «Томскгеомониторинг» (АО «Томскгеомониторинг») и ряда других организаций. Объектом исследования является восточный участок Васюганского болота (рис. 1), соответствующий водосбору реки Ключ (элемента системы «река Ключ – река Бакчар – река Чая – река Обь – Карское море») и

расположенный примерно в 160 км от г. Томска [7, 8].

На реке Ключ у с. Полынянка с 1972 по 1997 г. действовал водомерный пост Росгидромета. Там же с 1990-х гг. проводятся гидрологические и гидрохимические наблюдения специалистами Сибирского научно-исследовательского института торфа СО РАН (СибНИИТ СО РАН), ТГУ, Томского государственного педагогического университета (ТПУ) и Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (ИМКЭС СО РАН). Также следует отметить, что на прилегающей территории Васюганского болота (участок Васюганского торфяного месторождения № 5) были выполнены геологоразведочные работы на торф и комплекс работ по изучению тяжёлых металлов в торфах, в 1960 г. специалистами Института леса организован биогеоценологический стационар «Плотниково», а непосредственно на водосборе реки Ключ с 1990-х гг. функционируют стационары СибНИИТ СО РАН, ТПУ и ИМКЭС СО РАН [5, 9–15].

Особенностью указанных выше исследований является сосредоточенность пунктов гидрологических и гидрохимических наблюдений в основном на участках распространения мезотрофных и евтрофных болотных экосистем и прилегающих к ним олиготрофных участках, в той или иной мере



**Рис. 1.** Схема размещения исследуемого участка Васюганского болота: 1 – участок гидрохимических наблюдений; 2 – границы основной части болота

**Fig. 1.** Layout of the researched site of the Vasyugan mire: 1 is the site of hydrochemical researches; 2 are the borders of the basic part of the Vasyugan mire

испытывающих дренирующее влияние реки Ключ. Следовательно, использование полученных на этих участках данных для изучения широко распространённых в таёжной зоне Западной Сибири процессов современного заболачивания путём подтопления лесов и олиготрофизации торфяной залежи (в отсутствие русловой сети) предполагает ряд допущений и оговорок, причём не всегда очевидных и требующих дополнительного обоснования. С учётом этого в ТПУ с 2003 г. проводятся наблюдения по профилю, расположенному на водоразделе рек Ключ и Гавриловка (элемент системы «река Гавриловка – река Икса – река Чая – река Обь – Карское море»).

По данным геологоразведочных работ, на прилегающем с юга участке Васюганского торфяного месторождения № 5 максимальная глубина торфа составляет 5,3 м, средняя глубина – 1,95 м; торфа – верховые, переходные, низинные, смешанные; средние значения степени разложения торфа 22 %, зольности 6 %, влажности 90,1 %. Непосредственно на исследуемом профиле преобладают верховые и переходные торфа; глубина торфяной залежи – до 4,5 м, в среднем – 2,8 м. Граница водосбора реки Ключ в пределах рассматриваемого

участка (93 км по автодороге Томск–Бакчар) совпадает к мезотрофной окраиной на границе с заболоченным лесом, которая (по мере удаления от границы водосбора по направлению к истокам реки Ключ) сменяется сосново-сфагново-кустарничковым болотом – рямом, а затем грядово-мочажинным (ГМК) и грядово-мочажинно-озерковым (ГМОЖ) комплексами с включениями топей. Далее (за пределами исследуемого участка), по мере приближения к руслу реки Ключ, происходит замена ГМК и ГМОЖ в основном на «рям», а затем на мезотрофные и евтрофные внутриболотные экосистемы и, наконец, заболоченный лес (в долине реки Ключ). Более подробное описание участка приведено в работе [7, 8].

#### Объекты и методика исследования

Целью исследования является выявление закономерностей многолетних и внутригодовых изменений химического состава болотных вод деятельного горизонта торфяной залежи водораздельного участка Васюганского болота, характеризующегося преобладанием процессов олиготрофизации торфяной залежи. Основные задачи исследования: 1) выявление изменений химического состава бо-

лотных вод деятельного горизонта в течение 2003–2017 гг., внутри года и по мере удаления от границы исследуемого участка болота и заболоченного смешанного леса; 2) выявление связей между гидрохимическими показателями болотных вод и элементами водного баланса. Соответственно, методика исследования включала: 1) проведение полевых и лабораторных работ по отбору проб болотных вод из деятельного горизонта торфяной залежи; 2) статистический анализ гидрохимических и метеорологических данных, включавший корреляционный и регрессионный анализ, проверку на однородность по среднему (критерий Стьюдента) и дисперсии (критерий Фишера); 3) расчёты индексов насыщения болотных вод относительно ряда минералов и органо-минеральных соединений (на основе метода констант с использованием уравнения Дэвиса для определения коэффициентов активности заряженных частиц [7]).

Отбор проб болотных вод проводился в период с апреля 2003 г. по март 2017 г. В сентябре 2003 г., декабре 2013 и 2015 гг., апреле 2015 г. и октябре 2016 г. были выполнены исследования с наибольшим охватом всех внутриболотных экосистем, а в остальные периоды преимущественно опробовались болотные воды в пределах мезотрофной окраины и рьяма – олиготрофного сосново-сфагново-кустарничкового болота. Мезотрофная окраина представляет собой мезотрофную слабо облесённую топь и мезотрофное сосново-сфагново-кустарничковое болото.

Общее количество проб болотных вод, отобранных в пределах мезотрофной окраины – 20, в рьяме – 21, в грядово-мочажинном комплексе – 10. Кроме того, в 2015–2017 гг. в рьяме было отобрано 3 пробы снега, а также привлечены данные наблюдений АО «Томскгеомониторинг» на скважине № 110р государственной сети мониторинга недр, расположенной примерно в 36 км от исследуемого участка (рис. 1; водовмещающие отложения четвертичного возраста, средняя глубина залегания подземных вод – 7,3 м, минимальная – 5,6 м, максимальная – 9,9 м; использованы результаты определения pH, содержания главных ионов, Fe, Si, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> в 66 пробах).

В пробах болотных и снеговых вод проводилось определение значений pH (потенциометрический метод), перманганатной (ПО) и бихроматной (БО) окисляемости, содержания Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, CO<sub>2</sub> (титриметрический), SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (турбидиметрический), Si, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, фосфаты, Fe (фотометрический, масс-спектрометрический с индуктивно-связанной плазмой с использованием масс-спектрометра NexION 300D), Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> (ионная хроматография), Zn, Cu, Al (инверсионно-вольтамперометрический, атомно-абсорбционный, масс-спектрометрический с индуктивно-связанной плазмой). Лабораторные работы выполнены в аккредитованных лабораториях ТПУ и АО «Томскгеомониторинг». Более подробные сведения

о методике полевых и лабораторных работ приведены в [7, 8].

Обработка полученных данных включала в себя: оценивание статистических параметров, в том числе погрешностей определения среднего арифметического  $\delta_A$  и коэффициента корреляции  $\delta_r$  по формулам (1, 2); корреляционный и регрессионный анализ; проверку на однородность по среднему с использованием критерия Стьюдента  $K_S$  (3), по дисперсии – с помощью критерия Фишера  $K_F$  (4), на случайность – по критерию Питмена  $K_P$  (5) с использованием линейной модели тренда (6) при уровне значимости 5 %:

$$\delta_A \approx \frac{\sigma}{\sqrt{N}}, \quad (1)$$

$$\delta_r \geq 2 \frac{1-r_{xy}^2}{\sqrt{N-1}}, \quad (2)$$

$$K_S = \frac{|A_x - A_y|}{\sqrt{N_x D_x + N_y D_y}} \sqrt{\frac{N_x N_y (N_x + N_y - 2)}{N_x + N_y}}, \quad (3)$$

$$K_F = \frac{\max(D_x; D_y)}{\min(D_x; D_y)}, \quad (4)$$

$$K_P = k_1 \sqrt{\frac{D_t}{D_z}} \sqrt{\frac{N-2}{1-k_1 \sqrt{\frac{D_t}{D_z}}}}, \quad (5)$$

$$Z = k_1 t + k_2, \quad (6)$$

где  $N$ ,  $\sigma$  и  $D$  – объём, стандартное отклонение и дисперсия величины  $Z$ ;  $N_x$ ,  $N_y$ ,  $A_x$ ,  $A_y$ ,  $D_x$ ,  $D_y$  – объёмы, средние арифметические и дисперсии сравниваемых выборок  $x$  и  $y$ ;  $D_t$  – дисперсия временной координаты  $t$  (количество дней с 01.01.1900 г.);  $k_1$  и  $k_2$  – коэффициенты регрессии;  $r_{xy}$  – коэффициент корреляции между значениями  $x$  и  $y$ . Гипотеза об однородности сравниваемых выборок не отвергается, если фактические значения  $K_S$  и  $K_F$  меньше критических. Уравнение связи принимается удовлетворительным, если значения коэффициентов регрессии по модулю больше удвоенной погрешности их определения, а квадрат корреляционного отношения  $R^2$  больше 0,36 [16–18].

#### Результаты исследования и их обсуждение

В пределах рассматриваемого участка Васюганского болота по мере удаления от границы с заболоченным лесом выделяются три основные внутриболотные экосистемы: 1) мезотрофная окраина (полоса вдоль заболоченного леса шириной до 200 м со средней глубиной торфяной залежи около 1 м); 2) рьям – олиготрофное сосново-сфагново-кустарничковое болото (на участке от 200 до 900 м от границы болота со средней глубиной торфяной залежи 2,8 м); ГМК – грядово-мочажинный комплекс (на участке от 900 до 1900 м от границы бо-

лота и леса со средней глубиной торфяной залежи 3 м). Болотные воды деятельного горизонта всех трёх экосистем по классификации О.А. Алёкина [19] – пресные с очень малой минерализацией, содержат значительное количество органических веществ и продуктов их трансформации (табл. 1).

Проверка на однородность по среднему и дисперсии показала, что, во-первых, болотные воды рьяма и ГМК в целом за многолетний период с 2003 по 2017 гг. сопоставимы между собой по минерализации, перманганатной окисляемости, содержанию  $\text{NH}_4^+$ , Si, Al, Cu, фосфатов, но статистически различаются по величине рН (табл. 1, 2). Также выявлены отличия болотных вод в рьяме и ГМК от мезотрофной окраины. Они, предположительно, связаны с большей изменчивостью минерализации и содержания ряда элементов на границе леса и болота, которая, в свою очередь, определяется более значительными колебаниями уровней болотных вод. Например, в осенний период 2016 г. в районе ближайшей метеостанции Бакчар (в 36 км от исследуемого участка) выпало атмосферных осадков в среднем за сентябрь–ноябрь в количестве 24 мм/месяц при среднемноголетнем значении (за 1986–2016 гг.) 42 мм/месяц. Из-за недостаточного осеннего увлажнения в конце зимнего периода 2017 г. (21 марта) в мезотрофной окраине (50 м от границы болота) зафиксировано отсутствие гравитационных болотных вод при том, что уровень болотных вод в ГМК находился в диапазоне от 0,25 м (в мочажине – сразу под промерзшим слоем) до 0,35 м (в гряде), а в рьяме – в 0,37 м от поверхности.

Во-вторых, болотные воды даже мезотрофной окраины по химическому составу заметно ближе к снеготалым, а не к грунтовым водам, что свидетельствует о преобладании олиготрофизации торфяной залежи практически на всём исследуемом участке Васюганского болота. Статистический анализ показал, что минерализация вод наиболее обводнённых внутриболотных экосистем в целом возрастает с ростом атмосферного увлажнения (табл. 3) и, как следствие, некоторого увеличения водного стока. Причём наибольшее влияние этого фактора характерно для мезотрофной окраины, для которой получено уравнение связи (7):

$$\Sigma_{mi} = -0,354P + 0,022P^2; R^2 = 0,63, \quad (7)$$

где  $P$  – сумма атмосферных осадков на метеостанции Бакчар за месяц календарного года (мм/месяц), в котором проводился отбор пробы болотной воды. Для ГМК (с учётом проб воды и в гряде, и в мочажине) получена линейная зависимость (8), а для рьяма статистически значимое уравнение связи подобрать не удалось:

$$\Sigma_{mi} = 0,576P; R^2 = 0,47. \quad (8)$$

Следует отметить, что для рек обычно наблюдается обратная, чаще всего степенная зависимость между расходами и минерализацией воды [19]. Подобное несоответствие между речными и болотны-

ми водами объясняется, как показано в [20], тем, что общее описание связи между интенсивностью водообмена и минерализацией воды имеет вид (9), а между коэффициентами вариации гидрологических и гидрохимических показателей – вид (10):

$$Y = X^{k_3} \exp\left(\frac{k_4}{k_5}(X^{k_5} - 1)\right), \quad (9)$$

$$Cv_c \approx |k_3 + k_4| Cv_Q, \quad (10)$$

где  $k_0, k_1, k_2$  – эмпирические коэффициенты;  $Y=C/C_0$  и  $X=Q/Q_0$  – модульные коэффициенты концентрации и расхода воды;  $C_0$  и  $Q_0$  – математическое ожидание концентрации вещества и расхода воды;  $Cv_c$  и  $Cv_Q$  – коэффициенты вариации концентрации вещества и расхода воды. Для рек бассейна Оби большая часть наблюдений соответствует кривой спада по уравнению (9), а наиболее заметные изменения химического состава природных вод происходят на стадиях формирования склонового и подземного стока [20].

Судя по результатам корреляционного и регрессионного анализа с учётом данных о взаимосвязях атмосферных осадков и проточности болота [21], для болотных вод исследуемого участка Васюганья характерно именно увеличение минерализации болотных вод при повышении атмосферного увлажнения за счёт усиления выноса веществ из деятельного горизонта торфяной залежи до момента, когда резко увеличиваются проточность (сток в торфяной залежи за единицу времени через единицу длины контура стекания) и вклад ультрапресных снеготалых или дождевых вод. После этого следует ожидать некоторое уменьшение или стабилизацию минерализации болотных вод (в зависимости от особенностей пространственного распределения фильтрационных свойств торфяной залежи), причём в разных внутриболотных экосистемах влияние атмосферного увлажнения на химический состав болотных вод будет неодинаковым.

Отметим, что подобный механизм формирования химического состава болотных вод наблюдается не только на исследуемом участке Васюганского болота, но и в других болотных районах мира [22–24]. В целом наилучшая связь с атмосферным увлажнением характерна для внутриболотных экосистем с топяным подтипом торфяной залежи и максимальной однородностью микроландшафта, наихудшая – для лесного подтипа торфяной залежи (рьям), что, видимо, объясняется более значительным биогенным регулированием за счёт транспирации и большей контрастности фильтрационных свойств в корневом слое в лесном фитоценозе.

Гидрохимические наблюдения на болотах весьма трудоёмки. Как следствие, количество проб болотных вод обычно незначительно, а их отбор часто проводится неравномерно в течение года. В связи с этим указанные выше особенности фор-

**Таблица 1.** Средние значения гидрохимических показателей болотных, снеготалых и подземных вод в восточной части Васюганского болота

**Table 1.** Average values of hydrochemical parameters of mire, snow and ground waters in east part of the Vasyugan mire

Показатель Index	Объект Object	Весеннее половодье Spring flood	Летне-осенняя межень Summer-autumn low water	Зимняя межень Winter low water	Год Year
рН, единицы pH/Units	МО/MSOB*	3,89±0,12	4,70±0,46	4,02±0,33	4,24±0,22
	Рям/гуам	3,95±0,13	4,49±0,32	4,28±0,19	4,31±0,15
	ГМК/НСР	–	5,25±0,59	4,73±0,18	4,89±0,21
	Снег/snow	–	–	7,04±0,26	7,04±0,26
	Скважина 110р/HW 110р	7,24±0,16	7,20±0,11	7,14±0,17	7,19±0,08
$\Sigma_{mi}$ , мг/дм <sup>3</sup> mg/dm <sup>3</sup>	МО/MSOB*	16,3±10,3	31,5±14,3	19,7±5,80	22,8±5,80
	Рям/гуам	21,8±9,6	20,8±4,8	19,4±3,4	20,3±2,7
	ГМК/НСР	–	30,5±3,0	22,3±5,3	24,8±3,9
	Снег/snow	–	–	17,6±3,8	17,6±3,8
	Скважина 110р/HW 110р	348,7±29,9	324,5±13,8	343,1±22,1	335,6±11,4
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , –/–	МО/MSOB*	2,870±0,639	4,428±1,285	5,692±1,552	4,932±0,848
	Рям/гуам	4,328±1,360	3,695±1,721	4,625±1,107	4,197±0,820
	ГМК/НСР	–	1,393±0,078	3,022±1,437	2,534±1,013
	Снег/snow	–	–	0,772±0,536	0,772±0,536
	Скважина 110р/HW 110р	0,928±0,213	0,472±0,094	1,328±0,545	0,833±0,182
P*, –/–	МО/MSOB*	0,017±0,015	0,020±0,008	0,083±0,053	0,055±0,028
	Рям/гуам	0,019±0,011	0,032±0,016	0,083±0,025	0,067±0,019
	ГМК/НСР	–	0,018±0,011	0,092±0,038	0,070±0,028
	Снег/snow	–	–	0,018±0,017	0,018±0,017
Si, –/–	МО/MSOB*	1,61±1,23	2,82±0,36	5,62±0,99	4,14±0,63
	Рям/гуам	3,89±3,15	2,61±0,66	3,57±0,36	3,37±0,39
	ГМК/НСР	–	2,33±0,77	2,86±0,45	2,70±0,37
	Снег/snow	–	–	0,05±0,02	0,05±0,02
	Скважина 110р/HW 110р	4,17±1,27	2,33±1,27	2,75±1,27	2,90±1,27
Fe, –/–	МО/MSOB*	1,317±0,509	2,431±0,628	2,551±0,442	2,367±0,312
	Рям/гуам	2,003±0,510	2,096±0,347	1,759±0,274	1,810±0,199
	ГМК/НСР	–	2,310±0,270	1,328±0,244	1,622±0,235
	Снег/snow	–	–	0,018±0,005	0,018±0,005
	Скважина 110р/HW 110р	1,907±0,749	3,13±0,797	3,538±0,889	2,944±0,488
Al, мкг/дм <sup>3</sup> mkg/dm <sup>3</sup>	МО/MSOB*	–	294,9±102,1	750,4±352,0	627,6±286,2
	Рям/гуам	–	236,2±105,8	537,6±99,8	494,5±90,6
	ГМК/НСР	–	284,8±20,7	762,3±222,0	656,2±183,5
	Снег/snow	–	–	15,7±5,8	15,7±5,8
	Скважина 110р/HW 110р	–	–	–	–
Cu, то же (the same)	МО/MSOB*	–	1,1±0,4	3,7±0,8	2,6±0,6
	Рям/гуам	–	2,9±0,9	4,8±1,1	4,2±0,8
	ГМК/НСР	–	1,5±0,3	3,7±1,0	3,1±0,7
	Снег/snow	–	–	1,1±0,2	1,1±0,2
Zn, –/–	МО/MSOB*	–	17,3±7,0	53,7±16,8	36,2±11,0
	Рям/гуам	–	21,2±2,5	37,8±6,7	31,7±5,4
	ГМК/НСР	–	17,2±3,7	69,0±25,8	53,5±19,4
	Снег/snow	–	–	8,5±2,1	8,5±2,1
ПО, мгО/дм <sup>3</sup> PO, mgO/dm <sup>3</sup>	МО/MSOB*	48,87±3,90	102,51±21,43	96,58±10,69	93,07±9,66
	Рям/гуам	88,20±4,56	97,59±14,88	100,74±5,95	96,48±4,83
	ГМК/НСР	–	136,11±54,11	92,86±6,61	105,84±16,10
	Снег/snow	–	–	0,69±0,07	0,69±0,07
	Скважина 110р/HW 110р	3,59±0,42	3,04±0,25	3,47±0,39	3,29±0,19

Примечание: прочерк означает отсутствие данных или количество проб менее трёх; МО – мезотрофная окраина болота; рям – сосново-сфагново-кустарничковое болото; ГМК – грядово-мочажинный комплекс; скважина 110р – режимная скважина для наблюдений за составом подземных вод у с. Бакчар;  $\Sigma_{mi}$  – сумма главных ионов (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>); P\* – фосфор фосфатов; ПО – перманганатная окисляемость.

Note: «–» means absence of the data or quantity of samples less than three; MSOB is the mesotrophic border of an oligotrophic bog; ryam (Russian) is the oligotrophic, pine-dwarf-shrub-sphagnum raised bog; HRC is the hollow-ridge complex – mire type which combines low elongated ridges and hollows between them; HW 110p is the regime hydrogeological well 110p near the Bakchar settlement;  $\Sigma_{mi}$  is the sum of concentration of the main ions (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>); P\* is the phosphorus of phosphates; PO is the permanganate oxidability (chemical oxygen consumption with potassium permanganate/permanganate index).

**Таблица 2.** Результаты статистического анализа данных о составе снеготалых, подземных и болотных вод

**Table 2.** Results of the statistical analysis of data on composition of snow, ground and mire waters

Сравниваемые объекты/Compared objects		Показатель/Index	pH	$\Sigma_{mi}$	$NH_4^+$	P*	Si	Fe	Al	Cu	Zn	ПО/РО
МО/MSOB	Рям/Ryam	$K_s/K_{s,5\%}$	0,13	0,19	0,30	0,17	0,51	0,73	0,23	0,71	0,18	0,06
		$K_f/K_{f,5\%}$	0,87	1,73	0,41	0,77	0,92	0,95	2,35	0,67	1,04	0,36
	ГМК/HRC	$K_s/K_{s,5\%}$	0,87	0,11	0,81	0,16	0,76	0,75	0,04	0,22	0,36	0,09
		$K_f/K_{f,5\%}$	0,60	1,20	0,38	0,45	1,36	0,95	0,67	0,42	0,75	0,76
	Скв. 110р/HW 110р	$K_s/K_{s,5\%}$	7,73	7,87	3,55	–	0,35	0,34	–	–	–	11,10
		$K_f/K_{f,5\%}$	1,23	5,07	3,42	–	2,72	3,06	–	–	–	197,5
Снег/Snow	$K_s/K_{s,5\%}$	2,20	0,16	0,87	0,24	1,21	1,34	0,49	0,61	0,56	1,79	
	$K_f/K_{f,5\%}$	0,13	0,39	0,42	0,41	208,9	583,5	214,5	0,53	2,66	103,0	
Рям/Ryam	ГМК/HRC	$K_s/K_{s,5\%}$	1,05	0,44	0,57	0,03	0,52	0,27	0,40	0,46	0,55	0,03
		$K_f/K_{f,5\%}$	0,28	0,28	0,38	0,41	0,58	0,41	0,78	0,39	2,89	0,68
	Скв. 110р/HW 110р	$K_s/K_{s,5\%}$	4,24	37,79	0,37	–	0,19	0,89	–	–	–	2,25
		$K_f/K_{f,5\%}$	0,57	22,26	3,39	–	6,74	7,34	–	–	–	176,7
	Снег/Snow	$K_s/K_{s,5\%}$	3,12	0,17	0,73	0,47	1,52	1,58	1,08	0,81	0,90	1,86
		$K_f/K_{f,5\%}$	0,06	0,09	0,42	0,19	88,09	248,7	28,55	1,28	0,76	92,12
ГМК/HRC	Скв. 110р/HW 110р	$K_s/K_{s,5\%}$	5,17	5,57	1,38	–	0,04	0,56	–	–	–	19,73
		$K_f/K_{f,5\%}$	0,47	14,68	2,05	–	9,68	7,10	–	–	–	47,47
	Снег/Snow	$K_s/K_{s,5\%}$	2,17	0,40	0,39	0,41	1,62	1,56	0,83	0,61	0,53	2,91
		$K_f/K_{f,5\%}$	0,06	0,09	0,30	0,24	41,31	166,2	75,41	0,85	7,54	30,15

Примечание:  $K_s/K_{s,5\%}$  и  $K_f/K_{f,5\%}$  – отношение фактического и критического значений (при уровне значимости 5 %) критериев Стьюдента и Фишера; остальные обозначения приведены в примечании к табл. 1.

Note:  $K_s/K_{s,5\%}$  and  $K_f/K_{f,5\%}$  are the ratios of actual and critical values (at a significance value of 5 %) of Student and Fisher criteria; other designations are resulted in the note in table 1.

мирования гидрохимического режима болота необходимо учитывать при анализе многолетних изменений химического состава болотных вод деятельного горизонта внутриболотных экосистем. Так, анализ на однородность данных гидрохимических наблюдений на исследуемом участке Васюганского болота за 2003–2017 гг. позволил выявить статистически значимое уменьшение дисперсии суммарного содержания главных ионов ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $HCO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ) в водах мезотрофной окраины (рис. 2). Однако отбор проб с наиболее высокими содержаниями растворенных солей в 2003 и 2006 гг. проводился в месяцы с повышенным атмосферным увлажнением, а проверка данных метеонаблюдений на метеостанции Бакчар за 1965–2016 гг. не позволила выявить нарушений однородности годовых сумм атмосферных осадков. Таким образом, пока нет достоверных оснований для утверждения о существенном изменении основных гидрохимических показателей болотных вод на исследуемом участке в течение 2003–2017 гг.

Внутри года минимальные значения многих гидрохимических показателей достаточно часто приурочены к периоду весеннего половодья, когда состав болотных вод наиболее близок к составу талых вод, а максимальные – как к зимней, так и летней межени (табл. 1). В первом случае ключевую роль играет разбавление болотных вод снеготалыми. В последнем же случае, видимо, следует обращать больше внимания на приуроченность пробоотбора к стадии вегетативного цикла. В частности, имеющиеся материалы позволяют предположить, что повышенные концентрации  $NH_4^+$ , Si и

фосфатов в зимнюю межень связаны, скорее всего, с разложением остатков макро- и микрофлоры [7, 23]. В то же время при изучении внутригодового распределения гидрохимических показателей болотных вод необходимо учитывать удаленность от суходола, определяющую в общих чертах приток минеральных веществ. Последние подвергаются воздействию кислых болотных вод, что в ряде случаев приводит к повышению в болотных водах валовых содержаний химических элементов и их растворенных форм [24–31].

**Таблица 3.** Статистически значимые коэффициенты корреляции между гидрохимическими показателями болотных вод и месячными значениями атмосферного увлажнения по данным метеостанции Бакчар

**Table 3.** Statistically significant factors of correlation between hydrochemical parameters of bog waters and monthly values of atmospheric humidifying according to the Bakchar meteorological station

Экосистема Ecosystem	Гидрохимические показатели/Indexes				
	pH	$\Sigma_{mi}$	$NH_4^+$	Fe	ПО/РО
Мезотрофная окраина MSOB	0,64	0,71	-0,44	–	0,45
Рям/Ryam	0,38	0,43	-0,47	–	–
ГМК/HRC	–	0,70	–	–	0,65

Дальнейшее перераспределение химических элементов во внутриболотных экосистемах связано с особенностями фильтрационного потока в торфяной залежи. В частности, изменение концентраций кремния в болотных водах деятельного слоя на исследуемом участке Васюганского болота может объясняться, с одной стороны, выщелачи-

ванием первичных и трансформацией вторичных алюмосиликатов и ряда других минералов, содержащихся в частицах, поступающих в болото из атмосферного воздуха [23, 31] и с водным стоком с суходола на окраину болота. Косвенным подтверждением этого предположения является, например, разная степень насыщения болотных вод относительно кварца в весенний период в ряме и мезотрофной окраине (рис. 3, 4). В этот период в ряме основным источником кремния с большой вероятностью является атмосферный аэрозоль, а в мезотрофной окраине – атмосферный аэрозоль и приток с суходола. Но в последнем случае содержание кремния в среднем меньше, чем в ряме, а воды ненасыщены относительно целого ряда минералов, включая кварц (относительно которого болотные воды обычно несколько пересыщены или близки к равновесию; рис. 4). С другой стороны, в результате достаточно резкого изменения фильтрационных свойств и биогенного потребления происходит накопление кремния в ГМК.

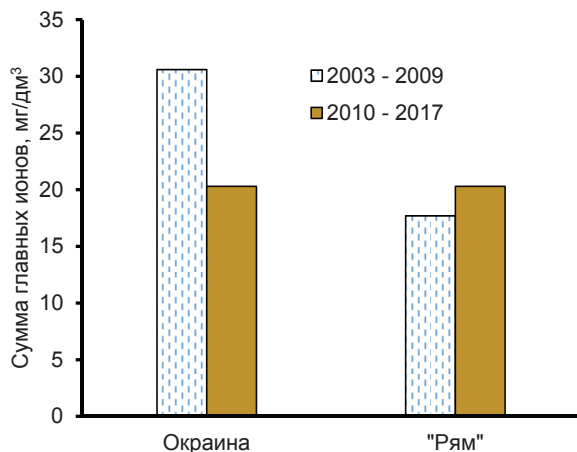


Рис. 2. Изменение средних значений суммы главных ионов в болотных водах исследуемого участка Васюганского болота (в мезотрофной окраине  $K_f/K_{f,5\%} = 1,3$ )

Fig. 2. Change of average values of the sum of the main ions concentrations in mire waters of the researched site of the Vasugan mire (mesotrophic border;  $K_f/K_{f,5\%} = 1,3$ )

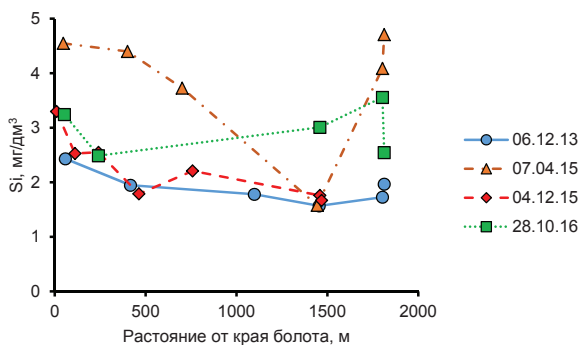


Рис. 3. Изменение концентраций Si в болотных водах 06.12.2013 г., 07.04.2015 г., 04.12.2015 г., 28.10.2016 г.

Fig. 3. Change of Si concentration in mire waters at 06.12.2013, 07.04.2015, 04.12.2015, 28.10.2016

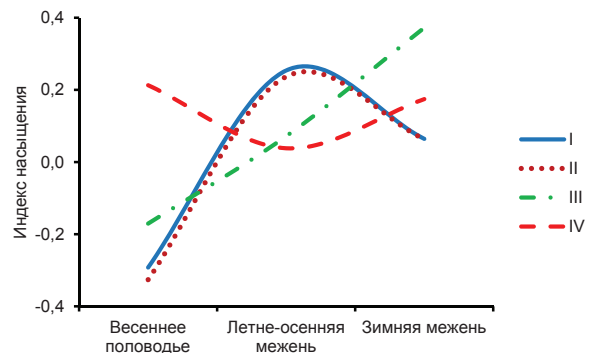


Рис. 4. Внутригодовое изменение среднесезонных индексов насыщения болотных вод относительно соединений кальция и гуминовых кислот ( $CaГК = Ca^{2+} + ГК$ ) и кварца ( $SiO_2 + 2H_2O = H_4SiO_4^0$ ): I – CaГК, мезотрофная окраина; II – CaГК, рям; III –  $SiO_2$ , мезотрофная окраина; IV –  $SiO_2$ , рям

Fig. 4. Intraannual change of average indexes of saturation of mire waters concerning connections of calcium and humic acids ( $CaГК = Ca^{2+} + ГК$ ) and quartz ( $SiO_2 + 2H_2O = H_4SiO_4^0$ ): I – CaГК, mesotrophic border; II – CaГК, ryam; III –  $SiO_2$ , mesotrophic border; IV –  $SiO_2$ , ryam

Определённую роль в формировании уровней содержания ряда металлов, возможно, играет и гуматный барьер [32], способствующий выведению из раствора их соединений с гуминовыми кислотами во всех изученных внутриболотных экосистемах в межень, особенно в летне-осеннюю, когда (предположительно, в результате разложения растительных остатков) болотные воды становятся пересыщенными относительно ряда органо-минеральных соединений (рис. 4).

#### Заключение

Анализ данных многолетних гидрохимических наблюдений на водораздельном участке Васюганского болота в районе села Польшанка (Томская область) показал, что, во-первых, в течение 2003–2017 гг. статистически значимые однонаправленные изменения химического состава болотных вод в деятельном горизонте торфяной залежи отсутствуют. Наблюдаемые колебания гидрохимических показателей обусловлены изменчивостью атмосферного увлажнения, которое в годовом разрезе периода 1965–2016 гг. остаётся статистически постоянным.

Во-вторых, в структуре исследуемого участка Васюганского болота выделяются три основных внутриболотных экосистемы – мезотрофная окраина, рям и ГМК. Гидрохимический режим мезотрофной окраины отличается наибольшими изменчивостью минерализации болотных вод и зависимостью от величины атмосферного увлажнения, а гидрохимический режим рьяма характеризуется наименьшим влиянием атмосферного увлажнения. Общими чертами гидрохимического режима всех трёх экосистем является определённое уменьшение минерализации в период весеннего половодья и увеличение соединений азота, фосфора, кремния и микроэлементов в зимнюю межень.

В-третьих, характер внутригодового распределения гидрохимических показателей определяется совместным влиянием водного режима, биохимических процессов и, предположительно, наличием гуматного барьера. Водный режим исследуемого участка, в пределах которого преобладает олиготрофизация болота, определяется преимущественно жидкими атмосферными осадками и снеготаянием. Биохимические процессы определяют перераспределение в болотных водах в зависимости от стадии вегетационного цикла содержания органических и биогенных веществ. Органические вещества образуют с металлами как коллоидные

комплексы, накапливающиеся в водной среде в отсутствие значимого стока, так и малорастворимые соединения [26, 28]. Это потенциально может способствовать ограничению роста минерализации болотных вод даже в условиях сильной их ненасыщенности относительно веществ, поступающих в болото с атмосферным аэрозолем, при минерализации растительных остатков или с водопритоком из заболоченного леса на мезотрофную окраину.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 17-05-00042 и Томского политехнического университета (проект ВИУ\_VAF\_144\_2014).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нейштадт М.И. Болота Обь-Иртышского междуречья // Природные условия освоения междуречья Обь-Иртыш / отв. ред. М.И. Нейштадт, Г.Д. Рихтер. – М.: АН СССР, Институт географии, 1972. – С. 322–346.
2. Пологова Н.Н., Лапшина Е.Д. Накопление углерода в торфяных залежах Большого Васюганского болота // Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития / под ред. М.В. Кабанова. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2002. – С. 174–179.
3. Eurasian Mires of the Southern Taiga Belt: Modern Features and Response to Holocene Palaeoclimate / Т. Minayeva, W. Bleuten, A. Sirin, E.D. Lapshina // Wetlands and Natural Resource Management. Ecological Studies. V. 190 / Eds. J.T.A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, D.F. Whigham. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. – P. 315–341.
4. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение / О.Л. Лисс, Л.И. Абрамова, Н.А. Аветов, Н.А. Березина, Л.И. Инишева, Т.В. Курнишкова, З.А. Слукка, Т.Ю. Толпышева, Н.К. Шведникова / под ред. В.В. Куваева. – Тула: Гриф и К°, 2001. – 584 с.
5. Васюганское болото (природные условия, структура и функционирование) / Л.И. Инишева, А.А. Земцов, О.Л. Лисс, С.М. Новиков, Н.Г. Инишев / под ред. Л.И. Инишевой. – Томск: ЦНТИ, 2003. – 212 с.
6. Great Vasyugan Mire: landscape structure and peat deposit structure features / А.Е. Berezin, V.A. Bazanov, A.A. Skugarev, T.A. Rybina, N.V. Parshina // International Journal of Environmental Studies. – 2014. – V. 71. – № 5. – P. 618–623. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/00207233.2014.942537> (дата обращения 14.10.2017).
7. Гидрогеохимические условия формирования олиготрофных болотных экосистем / О.Г. Савичев, А.К. Мазуров, И.П. Семилетов, В.А. Базанов, Н.В. Гусева, А.А. Хвощевская, Н.Г. Наливайко // Известия РАН. Серия географическая. – 2016. – № 5. – С. 60–69. URL: <http://dx.doi.org/10.15356/0373-2444-2016-5-60-69> (дата обращения 03.11.2017).
8. Eckstein Y., Savichev O.G., Pasechnik E.Yu. Two decades of trends in ground water chemical composition in The Great Vasyugan Mire, Western Siberia, Russia // Environmental Earth Sciences. – 2015. – № 1. – P. 3–15. DOI: 10.1007/s12665-014-3908-z.
9. Среднее содержание некоторых элементов-примесей в торфах юго-восточной части Западно-Сибирской плиты / С.И. Арбузов, В.С. Архипов, В.К. Бернатонис, В.А. Бобров, С.Г. Маслов, А.М. Межибор, Ю.И. Прейс, Л.П. Рихванов, А.Ф. Судыко, А.И. Сысо // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 1. – С. 44–48.
10. Оценка потоков минерального вещества по свойствам торфяных отложений Бакчарского болота (южная тайга Западной Сибири) / Ю.И. Прейс, В.А. Бобров, В.В. Будашкина, В.М. Гавшин // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 1. – С. 43–47.
11. Veretennikova E.E. Lead in the natural peat cores of ridge-hollow complex in the taiga zone of West Siberia // Ecological Engineering. – 2015. – V. 80. – P. 100–107.
12. Modes of occurrence of rare earth elements in peat from Western Siberia / S.I. Arbuzov, S.G. Maslov, R.B. Finkelman, A.M. Mezhibor, S.S. Penok, M.G. Blokhin, E.V. Peregudina // Journal of Geochemical Exploration. – 2017. – V. 10. – P. 1–22. URL: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.10.012> (дата обращения 12.10.2017).
13. Храмов А.А., Валуцкий В.И. Лесные и болотные фитоценозы восточного Васюганья (структура и биологическая продуктивность) / отв. ред. А.В. Кумина. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1977. – 222 с.
14. Бахнов В.К. Почвообразование. Взгляд в прошлое и настоящее. Биосферные аспекты. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. – 117 с.
15. Торфяные ресурсы Томской области и их использование / Л.И. Инишева, В.С. Архипов, С.Г. Маслов, Л.С. Михантьева. – Новосибирск: Сибирское отделение РАСХН, 1995. – 88 с.
16. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I – A discussion of principles // Journal of Hydrology. – 1970. – № 10 (3). – P. 282–290.
17. Пособие по определению расчётных гидрологических характеристик / под ред. Т.С. Шмидта. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 448 с.
18. Христофоров А.В. Надёжность расчётов речного стока. – М.: МГУ, 1993. – 168 с.
19. Алёкин О.А. Основы гидрохимии. – Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1970. – 444 с.
20. Савичев О.Г., Нгуен В.Л. О методике определения фоновых и аномальных значений гидрохимических показателей // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов – 2015. – Т. 326. – № 9. – С. 133–142.
21. Иванов К.Е. Водообмен в болотных ландшафтах. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 280 с.
22. Prevost M. Streamflow, water quality and substrate conditions of a drained black spruce peatland, Quebec, Canada // International Peat Journal. – 1999. – V. 9. – P. 21–36.
23. Калужный И.Л. Общие черты формирования гидрохимического режима и химического состава вод эвтрофных болотных массивов // Водное хозяйство России. – 2016. – № 3. – С. 30–46.
24. Vegetation characteristics and eco-hydrological processes in a pristine mire in the Ob River valley (Western Siberia) / A.M. Schipper, R. Zeefat, F. Tanneberger, J.P. van Zuidam, W. Hahne, S.A. Schep, S. Loos, W. Bleuten, H. Joosten, E.D. Lapshina, M.J. Wassen // Plant Ecol. – 2007. – V. 12. – P. 1–15. DOI: 10.1007/s11258-006-9253-x.



25. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты / отв. ред Н.П. Лавёров. – М.: Наука, 2004. – 677 с.
26. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода – порода: в 5 т. Т. 2. Система вода–порода в условиях зоны гипергенеза / С.Л. Шварцев, Б.Н. Рыженко, В.А. Алексеев, Е.М. Дутова, И.А. Кондратьева, Ю.Г. Копылова, О.Е. Лепкурова / отв. ред. Б.Н. Рыженко. – Новосибирск: СО РАН, 2007. – 389 с.
27. Мотузова Н.В. Соединения микроэлементов в почвах. Системная организация, экологическое значение, мониторинг. – М.: ЛИБРОКОМ, 2013. – 168 с.
28. Авессаломова И.А., Дьяконов К.Н., Савенко А.В. Геохимические ловушки на пути аниогенных элементов (на примере таёжных ландшафтов Восточно-Европейской равнины) // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География. – 2012. – № 1. – С. 29–35.
29. Ecohydrological analysis of a groundwater influenced blanket bog: occurrence of *Schoenus nigricans* in Roundstone Bog, Connemara, Ireland / A.P. Grootjans, G. Hensgens, R. Hogenboom, B. Aarts, J. Manschot, J.G.M. Roelofs // *Mires and Peat*. – 2016. – V. 18 (10). – P. 1–13.
30. Hydrological landscape settings of base-rich fen mires and fen meadows: an overview / A.P. Grootjans, E.B. Adema, W. Bleuten, H. Joosten, M. Madaras, M. Janáková // *Applied Vegetation Science*. – 2006. – V. 9. – P. 175–184.
31. Shotyk W. Peat bog archives of atmospheric metal deposition: geochemical evaluation of peat profiles, natural variations in metal concentration, and metal enrichment factors // *Environmental Reviews*. – 1996. – V. 4. – P. 149–183.
32. Ephraim J.H., Allard B. Metal Ion Binding by Humic Substances // *Modelling in Aquatic Chemistry* / Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech. – Paris, France: OECD, Nuclear Energy Agency, 1997. – P. 207–244.

*Поступила 13.12.2017 г.*

#### **Информация об авторах**

**Савичев О.Г.**, доктор географических наук, профессор Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Мазуров А.К.**, доктор геолого-минералогических наук, первый проректор, профессор Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 550.46

## CHANGES OF CHEMICAL COMPOSITION OF WATERS IN EAST PART OF THE VASYUGAN MIRE (WESTERN SIBERIA)

Oleg G. Savichev<sup>1</sup>,  
OSavichev@mail.ru

Aleksey K. Mazurov<sup>1</sup>,  
akm@tpu.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**Relevance.** Studies of changes in chemical composition of mire waters is the important part of research of environment and climate changes at ecological monitoring at oil and gas exploration, limitation of anthropogenous influences on water objects and efficiency of estimation of contaminated lands reclamation.

**The aim** of the research is to reveal the long-term and intraannual changes of chemical composition of mire waters in east part of the Vasyugan mire.

**Methods:** landscape-geochemical and statistical methods, methods of definition of chemical composition of mire waters, thermodynamic calculations.

**Results and conclusions.** The authors have analyzed the time changes in chemical composition of waters of east part of the Vasyugan mire (the Western Siberia, the Ob river basin, the Tomsk region) within the limits of three intramire ecosystems (mesotrophic border of ryam; ryam (Russian) – oligotrophic pine-dwarf-shrub-sphagnum raised bog; hollow-ridge complex – mire type which combines ridges and hollows). It is shown that for 2003–2017 there were no statistically significant changes of chemical composition of mire waters in active horizon of a peat deposit. Observable fluctuations of hydrochemical parameters are caused by variability of atmospheric humidity which remains statistically constant in an annual section of the period of 1965–2016. Hydrochemical regime of mesotrophic border differs in the highest variability of total dissolved solids of mire waters and dependence on atmospheric precipitation value, and hydrochemical regime of ryam is characterized by the least influence of atmospheric precipitation. The common features of hydrochemical regime of all of three ecosystems is the certain reduction of mineralization during spring flood and increase in N-, P-, Si-substances and microelements in winter low water.

### Key words:

The Vasyugan mire, mire waters, chemical composition, long-term changes, intraannual changes.

The research was financially supported by the RFBR grants no. 17–05–00042 and 13–05–98045 and Tomsk Polytechnic University (project BNY\_VAF\_144\_2014).

### REFERENCES

1. Neyshtadt M.I. Bolota Ob-Irtyshskogo mezhdurechya [Bogs of the Ob-Irtysh interfluvial] *Prirodnye usloviya osvoeniya mezhdurechya Ob-Irtysh* [Natural conditions of the development interfluvies Ob and Irtysh]. Eds. M.I. Neyshtadt, G.D. Rihter. Moscow, Institut geografii AN SSSR Publ., 1972. pp. 322–346.
2. Pologova N.N., Lapshina E.D. Nakoplenie ugleroda v torfyanykh zalezakh Bolshogo Vasuganskogo bolota [Carbon accumulation in peat bog deposits of the Great Vasyugan]. *Bolshoe Vasuganskoe boloto. Sovremennoe sostoyanie i protsessy razvitiya* [Big Vasyugan bog. Current status and development]. Tomsk, Institute of Atmospheric Optics SB RAS Publ., 2002. pp. 174–179.
3. Minayeva T., Bleuten W., Sirin A., Lapshina E.D. Eurasian Mires of the Southern Taiga Belt: Modern Features and Response to Holocene Palaeoclimate. *Wetlands and Natural Resource Management. Ecological Studies*. Vol. 190. Eds. J.T.A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, D.F. Whigham. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2006. pp. 315–341.
4. Liss O.L., Abramova L.I., Avetov N.A. *Bolotnye sistemy Zapadnoy Sibiri i ikh prirodookhrannoe znachenie* [Bog of Western Siberia and their conservation value]. Tula, Grif i K° Publ., 2001. 584 p.
5. Inisheva L.I., Zemtsov A.A., Liss O.L., Novikov S.M., Inishev N.G. *Vasyuganskoe boloto (prirodnye usloviya, struktura i funkcionirovanie)* [The Vasyugan mire (an environment, structure and functioning)]. Ed. by L.I. Inisheva. Tomsk, CSTI Publ., 2003. 212 p.
6. Berezin A.E., Bazanov V.A., Skugarev A.A., Rybina T.A., Parshina N.V. Great Vasyugan Mire: landscape structure and peat deposit structure features. *International Journal of Environmental Studies*, 2014, vol. 71, no. 5, pp. 618–623. Available at: <http://dx.doi.org/10.1080/00207233.2014.942537> (accessed 14 October 2017).
7. Savichev O.G., Mazurov A.K., Semiletov I.P., Bazanov V.A., Guseva N.V., Khvashchevskaya A.A., Nalivajko N.G. Hydrogeochemical conditions of formation of oligotrophic bog ecosystems. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2016, no. 5, pp. 60–69. Available at: <http://dx.doi.org/10.15356/0373-2444-2016-5-60-69> (accessed 03 November 2017). In Rus.
8. Eckstein Y., Savichev O.G., Pasechnik E.Yu. Two decades of trends in ground water chemical composition in The Great Vasyugan Mire, Western Siberia, Russia. *Environmental Earth Sciences*, 2015, no. 1, pp. 3–15. DOI: 10.1007/s12665-014-3908-z.
9. Arbuzov S.I., Arkhipov V.S., Bernatonis V.K., Bobrov V.A., Maslov S.G., Mezhibor A.M., Preis Yu.I., Rikhvanov L.P., Sudyko A.F., Syso A.I. Average content of several elements-admixtures in peats of south-east part of Western-Siberian plate. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 315, no. 1, pp. 44–48. In Rus.
10. Preiss Yu.I., Bobrov V.A., Budashkina V.V., Gavshin V.M. Estimation of streams of mineral substance on properties of peat sediments of the Bakchar mire (a southern taiga zone of the Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 316, no. 1, pp. 43–47. In Rus.

11. Veretennikova E.E. Lead in the natural peat cores of ridge-hollow complex in the taiga zone of West Siberia. *Ecological Engineering*, 2015, vol. 80, pp. 100–107.
12. Arbutov S.I., Maslov S.G., Finkelman R.B., Mezhibor A.M., Ilenok S.S., Blokhin M.G., Peregudina E.V. Modes of occurrence of rare earth elements in peat from Western Siberia. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, no. 10, pp. 1–22. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.10.012> (accessed 12 October 2017).
13. Khranov A.A., Valucky V.I. *Lesnye i bolotnye fitotsenozy vostochnogo Vasyuganiya (struktura i biologicheskaya produktivnost)* [Forest and mire phytocenoses of east part of the Vasyugan mire (structure and biological efficiency). Ed. by A.V. Kuminov. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977. 222 p.
14. Bakhnov V.K. *Pochvoobrazovanie. Vzgl'yad v proshloe i nastoyashchee. Biosfernye aspekty* [Soil formation. A view in the past and the present. Biospheric aspects]. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Science Publ. house, 2002. 117 p.
15. Inisheva L.I., Arkhipov V.S., Maslov S.G., Mikhantjeva L.S. *Torfyanые ресурсы Tomskoy oblasti i ikh ispolzovanie* [Peat resources of Tomsk region and their use]. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Agrarian Science Publ. house, 1995. 88 p.
16. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I – A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, no. 10 (3), pp. 282–290.
17. *Posobie po opredeleniyu rasschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Manual in definition of hydrological characteristics]. Ed. by T.S. Schmidt. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1984. 448 p.
18. Khristophorov A.V. *Nadezhnost raschetov rechnogo stoka* [Reliability of calculations of a river flow]. Moscow, Moscow State University Publ., 1993. 168 p.
19. Alekin O.A. *Osnovy gidrokhimii* [Bases of hydrochemistry]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1970. 444 p.
20. Savichev O.G., Nguen V.L. The technique for determining background and extreme values of hydrogeochemical parameters. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 9, pp. 133–142. In Rus.
21. Ivanov K.E. *Vodoobmen v bolotnykh landschaftakh* [Water exchange in mire landscapes]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975. 280 p. In Rus.
22. Prevost M. Streamflow, water quality and substrate conditions of a drained black spruce peatland, Quebec, Canada. *International Peat Journal*, 1999, vol. 9, pp. 21–36.
23. Kalyuzhny I.L. The common features of formation of a hydrochemical regime and chemical composition of eutropic fen waters. *Vodnoe khozyaistvo Rossii*, 2016, no. 3, pp. 30–46. In Rus.
24. Schipper A.M., Zeefat R., Tanneberger F., Van Zuidam J.P., Hahne W., Schep S.A., Loos S., Bleuten W., Joosten H., Lapshina E.D., Wassen M.J. Vegetation characteristics and eco-hydrological processes in a pristine mire in the Ob River valley (Western Siberia). *Plant Ecol.*, 2007, no. 12, pp. 1–15. DOI: 10.1007/s11258-006-9253-x.
25. Kraynov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod: teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty* [Geochemistry of ground waters: theoretical, applied and environmental aspects]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 677 p. In Rus.
26. Shvartsev S.L., Ryzhenko B.N., Alekseev V.A., Dutova E.M., Kondratieva I.A., Kopylova Yu.G., Lepokurova O.E. *Geologicheskaya evolyutsiya i samoorganizatsiya sistemy voda–poroda. T. 1. Sistema voda–poroda v usloviyakh zony gipergenez* [Geological evolution and self-organizing of water–rock system. V. 1. Water–rock system in conditions of a zone of active water exchange]. Ed. by B.N. Ryzhenko. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Science Publ. house, 2007. 389 p.
27. Motuzova N.V. *Soedineniya mikroelementov v pochvakh. Sistematicheskaya organizatsiya, ekologicheskoe znachenie, monitoring* [Microelements in soils. System organization, ecological value, monitoring]. Moscow, LIBROCOM Publ., 2013. 168 p. In Rus.
28. Avesalomova I.A., Diakonov K.N., Savenko A.V. Geochemical traps on a path of anionogenous elements (by example of taiga landscapes of East European plain). *Vestnik Moskov. univer.*, 2012, no. 1, pp. 29–35. In Rus.
29. Grootjans A.P., Hensgens G., Hogenboom R., Aarts B., Manschot J., Roelofs J.G.M. Ecohydrological analysis of a groundwater influenced blanket bog: occurrence of *Schoenus nigricans* in Roundstone Bog, Connemara, Ireland. *Mires and Peat*, 2016, vol. 18 (10), pp. 1–13.
30. Grootjans A.P., Adema E.B., Bleuten W., Joosten H., Madaras M., Janáková M. Hydrological landscape settings of base-rich fen mires and fen meadows: an overview. *Applied Vegetation Science*, 2006, vol. 9, pp. 175–184.
31. Shotyk W. Peat bog archives of atmospheric metal deposition: geochemical evaluation of peat profiles, natural variations in metal concentration, and metal enrichment factors. *Environmental Reviews*, 1996, vol. 4, pp. 149–183.
32. Ephraim J.H., Allard B. Metal Ion Binding by Humic Substances. *Modelling in Aquatic Chemistry*. Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech. Paris, France, OECD, Nuclear Energy Agency, 1997. pp. 207–244.

Received: 13 December 2017.

#### Information about the authors

**Oleg G. Savichev**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Aleksey K. Mazurov**, Dr. Sc., vice-rector, professor, National Research Tomsk Polytechnic University.