

## ОСОБЕННОСТИ ГИДРОХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ВАСЮГАНСКОГО БОЛОТА В МЕЖДУРЕЧЬЕ РЕК БАКЧАР И ИКСА (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)\*

© 2018 г. Е.С. Воистина<sup>1</sup>, Ю.А. Харанжевская<sup>1,2</sup>, А.А. Синюткина<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа – филиал ФГБУН «Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук», г. Томск, Россия

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск, Россия

**Ключевые слова:** болото, химический состав вод, гидрохимический режим, индексы сезонности, антропогенная нагрузка, Васюганское болото, р. Бакчар, р. Икса, Западная Сибирь.



Е.С. Воистина Ю.А. Харанжевская А.А. Синюткина

Представлен анализ гидрохимического режима и пространственных закономерностей изменения состава вод северо-восточной части Васюганского болота на междуречье рек Бакчар и Икса.

Отмечено, что особенностью гидрохимического режима вод верхового болота является трансформация химического состава с изменением класса, группы и типа вод в течение года. В пределах болота по характеристикам химического состава болотных вод на основе кластерного анализа выделены три кластера, достоверные различия которых отмечаются по величине минерализации, содержанию ионов  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}_{\text{общ}}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ , гуминовых и фульвокислот,  $\text{C}_{\text{орг}}$  и  $\text{CO}_2$ . Анализ индексов сезонности показал, что в течение вегетационного сезона отмечается два значимых максимума сезонной волны химического состава болотных вод – в марте и сентябре. Отмечено, что при росте суммы температур приземного слоя воздуха выше  $10\text{ }^\circ\text{C}$  в водах верхового болота растет величина рН, содержание  $\text{CO}_2$ , ионов аммония, сульфат-ионов, железа, органических веществ (гуминовых и фульвокислот,  $\text{C}_{\text{орг}}$ ).

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-00187 –мол\_а

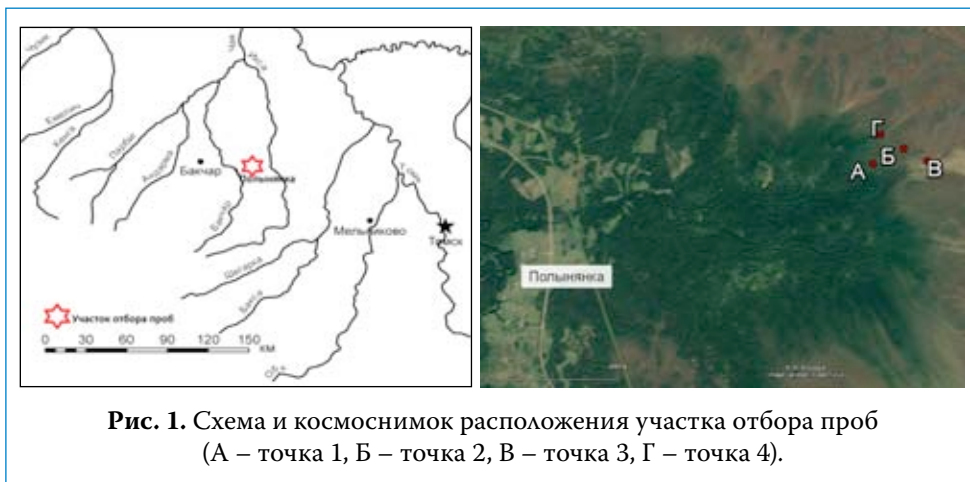
Процесс болотообразования получил широкое распространение на территории Западно-Сибирской равнины и стал мощным средообразующим фактором. Болота занимают здесь огромные пространства, оказывая многофакторное влияние на прилегающие территории. Велика роль болот в формировании гидрохимического стока и качества вод рек Западной Сибири. Проведенные ранее исследования показали, что химический состав болотных вод имеет региональные особенности по содержанию химических элементов и изменяется во времени [1–9]. Специфические черты гидрохимического статуса болотных вод определяются значениями ведущих физико-химических показателей – рН, Eh, общей минерализацией и ее основными составляющими, характерными газами и органическими веществами [10–11]. В настоящее время немало работ посвящено исследованию химического состава и гидрохимического режима болот [12–15], особенно следует отметить крупные обобщения по гидрохимии болот Урала и Приуралья [16], болотам Горного Алтая [17], Васюганскому болоту [18], по болотам нижней части бассейна р. Томи [19–20] и др. Тем не менее, данная проблема остается актуальной и недостаточно хорошо изученной в условиях изменения климата и усиления антропогенной нагрузки на водные объекты. Востребованность такого рода исследований значительно возрастает при разработке нормативов допустимых сбросов веществ в водные объекты (НДС) в пределах труднодоступных заболоченных территорий, для которых требуется расчет фоновых концентраций химического состава болотных вод и проведение большого объема региональных гидрохимических исследований.

Цель данной работы – исследование гидрохимического режима северо-восточной части Васюганского болота в междуречье рек Бакчар и Икса, а также оценка диапазона сезонных колебаний концентраций основных компонентов химического состава болотных вод и их территориальной вариации для обоснования величин фоновых концентраций.

#### **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Исследования проводились на участке верхового болота в междуречье рек Бакчар и Икса (центральная часть Обь-Иртышского междуречья, северо-восточные отроги Васюганского болота, стационар «Васюганский» Сибирского научно-исследовательского института сельского хозяйства и торфа) в районе, удаленном от антропогенного воздействия в пределах типичных болотных микроландшафтов, характеризующихся различной динамикой водного режима, мощностью торфяной залежи и, соответственно, условиями формирования химического состава вод: сосново-кустарничково-сфагновый с мощностью торфяной залежи 1 м (точка 1), сосново-кустарничково-сфагновый с мощностью торфяной залежи 3 м (точка 2), осоково-сфагновый с мощностью торфяной залежи 2,75 м (топь

выклинивания, точка 3), сосново-кустарничково-сфагновый с мощностью торфяной залежи 0,8 м (точка 4) (рис.1). По характеристике водного режима сосново-кустарничково-сфагновые болотные микроландшафты характеризуются значительной амплитудой колебания в пределах от 24 см до 31–36 см (точки 2, 4, 1), которая возрастает от центра к периферии болотного массива при среднем уровне болотных вод –13 см, –30 см, –25 см ниже средней поверхности болота. В пределах топяного осоково-сфагнового верхового болотного микроландшафта амплитуда колебания уровней снижается до 16 см, а среднегодовое значение уровня болотных вод повышается до отметки –3 см ниже поверхности болота.



**Рис. 1.** Схема и космоснимок расположения участка отбора проб (А – точка 1, Б – точка 2, В – точка 3, Г – точка 4).

Отбор проб болотной воды осуществляли с глубины 40–50 см с периодичностью 1 раз в месяц с марта по сентябрь за период, который включал многоводные (2009, 2011), средние (2008, 2007, 2010) и маловодные годы (2006, 2012) из специально оборудованных водоотборных колодцев глубиной 1 м (табл. 1).

**Таблица 1.** Годовая сумма осадков и положительных температур по данным метеостанции у с. Бакчар

Показатель	Год						
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Сумма осадков за год, мм	428	501	457	626	491	527	337
Сумма положительных температур за год, °С	1800	1762	1828	1678	1742	1728	2156

Перед отбором проб водоотборные колодцы вычерпывали, чтобы исключить разбавление вод за счет атмосферных осадков. Сразу после от-

бора определяли температуру воды и неустойчивые компоненты рН,  $O_2$ ,  $CO_2$ , проводили консервацию проб для определения  $Fe_{\text{общ}}$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ . Консервацию проб для определения аммония и нитрат ионов осуществляли добавлением хлороформа, для определения железа общего добавляли концентрированную соляную кислоту до рН менее 2. Определение содержания растворенного  $O_2$  в болотных водах проводилось до вычерпывания водоотборных колодцев с использованием оксиметра Oxi 3205 фирмы WTW (Германия). Величину рН измеряли с помощью полевого прибора рН-200 фирмы НМ Digital (США). Определение растворенного углекислого газа проводили титрованием проб раствором NaOH в присутствии сегнетовой соли и индикатора фенолфталеин [21]. Химический анализ макрокомпонентного состава болотных вод выполняли с применением аттестованных методик в лабораторно-аналитическом центре Сибирского научно-исследовательского института сельского хозяйства и торфа – филиале Сибирского федерального научного центра агробиотехнологий РАН.

Концентрацию  $CO_2$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Cl^-$  в воде устанавливали титриметрическим методом,  $Fe_{\text{общ}}$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ ,  $SO_4^{2-}$  – спектрофотометрическим методом, концентрацию ионов  $K^+$ ,  $Na^+$  – методом пламенной фотометрии (ПФА-378, Россия). Минерализацию вод оценивали по сумме ионов. Гуминовые (ГК) и фульвокислоты (ФК), ХПК в болотных водах определяли согласно [22],  $C_{\text{орг}}$  – в соответствии с [23].

Методика исследований включала анализ химического состава болотных вод, гидрохимического режима, а также изучение условий формирования и пространственных закономерностей изменения состава вод. Оценка условий формирования химического состава болотных вод и особенностей гидрохимического режима болота проводилась с применением данных наблюдений за температурой воздуха и количеством атмосферных осадков по метеостанции у с. Бакчар.

Методика анализа данных включала проверку рядов на соответствие нормальному закону распределения по критериям Колмагорова–Смирнова, Лилиефорса путем анализа коэффициентов асимметрии и эксцесса, на однородность – по критериям Стьюдента, Фишера, Манна–Уитни, на наличие выбросов с учетом требования  $X+3\sigma$ . Проведены также кластерный анализ и классификация исследуемых болотных микроландшафтов по всему перечню показателей химического состава болотных вод по непараметрическому критерию Манна–Уитни. Для проверки гипотезы о нормальном распределении характеристик химического состава болотных вод проведено сравнение рассчитанных коэффициентов асимметрии (Cs) и эксцесса с их критическими значениями, которые определялись по формулам согласно [24].

$$C_{s_{кр}} = 3 \sqrt{\frac{6(n-1)}{(n+1)(n+3)}} \quad (1)$$

$$E_{кр} = 5 \sqrt{\frac{24n(n-2)(n-3)}{(n+1)^2(n+3)(n+5)}} \quad (2)$$

где  $n$  – число наблюдений в выборке.

Кластерный анализ проводили с применением иерархического метода одиночной связи с расчетом евклидова расстояния. Анализ закономерностей сезонных изменений компонентов химического состава болотных вод осуществлен путем построения сезонной волны и расчетом индексов сезонности  $I$ :

$$I = \frac{X_i}{X_n} 100 \%, \quad (3)$$

где  $X_i$  – концентрация компонента за  $i$  месяц, осредненная за многолетний период (2006–2012 гг.), мг/л.

$X_n$  – среднемноголетняя концентрация компонента, мг/л [25].

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Образование и развитие верховых болот сопровождается формированием особого типа природных вод, богатых органическими веществами. Исследования показали, что воды верхового болота практически не содержат растворенного кислорода, обладают низкой степенью минерализации, кислой средой, высокой цветностью и содержат в больших концентрациях органические вещества. Болотные микроландшафты северо-восточной части Васюганского болота, в сравнении с опубликованными материалами по европейской территории России [1, 26], отличаются преобладанием гидрокарбонатного или хлоридного класса вод (а не сульфатного) кальциевой и магниевой группы. Так, в соответствии с классификацией О.А. Алёкина [27], воды сосново-кустарничково-сфагнового микроландшафта (высокий рям, точка 1) пресные, гидрокарбонатного класса кальциевой группы третьего типа  $C_{III}^{Ca}$ ; сосново-кустарничково-сфагнового микроландшафта (низкий рям, точка 2) сосново-кустарничково-сфагнового микроландшафта (высокий рям, точка 4) и осоково-сфагнового микроландшафта (топь, точка 3) пресные, хлоридного, сульфатного класса кальциевой и магниевой группы четвертого типа ( $Cl_{IV}^{Ca, Mg}$ ,  $S_{IV}^{Ca, Mg}$ ,  $Cl_{IV}^{Mg}$ ,  $S_{IV}^{Mg}$ ). Однако в течение года воды сосново-кустарничково-сфагнового микроландшафта (точка 1) трансформируются в воды хлоридного класса кальциевой группы четвертого типа  $Cl_{IV}^{Ca}$ . Противоположная тенденция наблюдается в водах сосново-кустарничково-сфагнового (точка 2), сосново-кустарничково-сфагнового (точка 4) и осоково-сфагнового микроландшафтов (точка 3), которые транс-

формируются в воды гидрокарбонатного класса кальциевой или магниевой группы третьего типа ( $C_{III}^{Ca, Mg}$ ,  $C_{III}^{Mg}$ ). Объяснить это можно изменением соотношения форм карбонатного равновесия, увеличением и уменьшением количества ионов водорода, что связано с различными условиями формирования их химического состава (табл. 2).

Проведенный кластерный анализ показал, что в пределах северо-восточной части Васюганского болота по характеристикам химического состава болотных вод можно выделить три кластера (рис. 2). Следует отметить тот факт, что облесенный сосново-кустарничково-сфагновый микроландшафт (точка 4) по химическому составу вод объединяется в класс с сосново-кустарничково-сфагновым (точка 2) с более разреженным древесным ярусом, что связано с бедным составом подстилающих пород микроландшафта (точка 4) и значительным влиянием располагающейся выше по уклону местности фильтрационной топи.

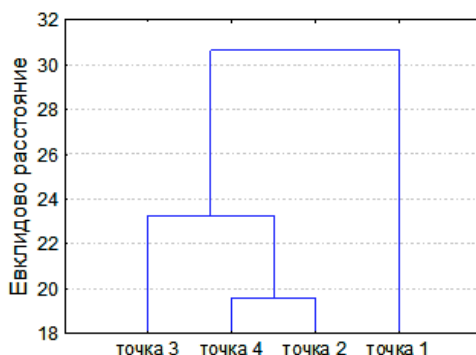


Рис. 2. Дендрограмма химического состава болотных вод исследуемых болотных микроландшафтов.

Классификация исследуемых болотных микроландшафтов по всему перечню показателей химического состава болотных вод по непараметрическому критерию Манна–Уитни показала, что достоверные различия болотных микроландшафтов отмечаются по величине минерализации вод, содержанию ионов  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Fe_{общ}^{2+}$ ,  $NH_4^+$ ,  $NO_3^-$ , гуминовых и фульвокислот,  $C_{орг}$  и  $CO_2$ .

Проверка рядов по химическому составу болотных вод на однородность с применением параметрических критериев Стьюдента и Фишера и непараметрического критерия Манна–Уитни показала, что ряды в целом однородны. Однако гипотеза о нормальном законе распределения величин зачастую отвергается, что связано с тем, что в пределах вегетационного периода отмечается значительный диапазон изменения концентраций компонентов,

коэффициент вариации изменяется в пределах от 0,11 до 1,17, наибольшая вариация в содержании компонентов отмечается для железа, сульфат-ионов и гидрокарбонат-ионов. Определяющую роль в этом случае играет водность года и степень концентрирования раствора в предпаводочный период при наличии снежного покрова и промерзании верхнего слоя торфяной залежи. Следует отметить, что гипотеза о нормальном распределении величин концентраций компонентов химического состава болотных вод наиболее часто принимается на участках сосново-кустарничково-сфагнового (точка 2) и осоково-сфагнового (точка 3) микроландшафтов, для которых характерна меньшая вариация содержания компонентов в болотных водах.

В соответствии с классификацией природных вод по величине рН воды северо-восточной части Васюганского болота можно отнести к кислым и слабокислым. Водородный показатель вод контролирует присутствие в водном растворе большинства химических элементов и определяет форму их нахождения в растворе [28], в водах верхового болота он изменяется в широких пределах от 3,05 до 6,25.

По величине минерализации воды северо-восточной части Васюганского болота характеризуются как пресные, в пределах исследуемых болотных микроландшафтов минерализация вод в среднем составляет 36,1 мг/л (рис. 3). Общее содержание химических элементов в водах верхового болота определяется условиями поступления элементов на поверхность болота в результате выпадения атмосферных осадков, со стоком элементов в толще торфяной залежи, а также в результате биохимических реакций. Анализ сезонной динамики минерализации показывает, что наименьшие значения общего содержания химических элементов болотных вод наблюдаются в период весеннего снеготаяния, летом значения минерализации возрастают вследствие активизации процессов разложения растительных остатков и торфа. Осенью значения минерализации вод могут увеличиться в период отсутствия атмосферных осадков и уменьшиться при их выпадении за счет разбавления болотных вод, а также ослабления процессов разложения торфа.

В многолетней динамике значительное влияние на увеличение компонентов в составе болотных вод оказывает сумма активных температур и уровень болотных вод, поэтому после продолжительных теплообеспеченных периодов происходит интенсивная трансформация растительных остатков, их минерализация, а в дальнейшем, после подъема уровня болотных вод, поступление в болотные воды минеральных веществ, освободившихся при разложении растений. К примеру, в теплообеспеченный 2008 г. произошло накопление минеральных веществ в торфяной залежи, а в многоводный 2009 г. отмечено их поступление в болотные воды, в результате чего выросла сумма ионов в составе вод в пределах сосново-кустарничково-

**Таблица 2.** Статистические характеристики химического состава вод верхового болота за период 2006–2012 гг.

Компонент	Точка 1				Точка 2				Точка 3				Точка 4			
	X	Cv	S	E	X	Cv	S	E	X	Cv	S	E	X	Cv	S	E
pH	4,47	11	<b>1,31</b>	0,59	3,87	12	<b>3,02</b>	<b>4,91</b>	4,05	12	<b>2,31</b>	<b>3,49</b>	4,13	12	0,84	<b>1,28</b>
K <sup>+</sup>	0,63	54	0,50	-0,20	0,68	56	0,66	0,03	0,97	83	<b>2,55</b>	<b>3,59</b>	0,73	79	<b>1,73</b>	<b>1,61</b>
Na <sup>+</sup>	1,54	85	<b>1,67</b>	<b>1,45</b>	1,00	72	0,70	0,02	1,27	76	<b>1,15</b>	0,54	1,10	100	<b>3,01</b>	<b>4,45</b>
Ca <sup>2+</sup>	9,51	57	<b>2,96</b>	<b>4,74</b>	5,05	40	-0,01	-0,31	4,78	43	0,26	0,01	5,96	42	0,43	0,08
Mg <sup>2+</sup>	4,55	59	<b>1,02</b>	0,49	2,25	66	<b>1,58</b>	<b>1,13</b>	2,58	62	<b>1,39</b>	0,86	3,53	56	0,64	-0,10
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	7,11	45	0,91	0,22	6,05	39	<b>1,48</b>	<b>1,18</b>	3,79	48	<b>1,05</b>	0,60	4,73	33	0,19	-0,13
Fe <sub>общ</sub>	3,24	117	<b>4,40</b>	<b>7,36</b>	1,71	38	0,59	0,30	1,24	38	<b>1,16</b>	0,80	2,11	67	<b>3,61</b>	<b>6,28</b>
Cl <sup>-</sup>	4,47	44	0,92	-0,03	3,51	49	<b>1,29</b>	0,40	2,87	56	<b>1,17</b>	0,47	3,22	51	<b>1,19</b>	0,53
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	4,08	99	<b>3,77</b>	<b>6,49</b>	3,92	63	0,80	0,08	3,63	55	0,44	0,15	4,39	95	<b>2,14</b>	<b>1,56</b>
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1,74	40	-0,37	0,25	1,43	35	-0,76	0,26	0,88	37	-0,38	0,23	1,35	53	<b>2,23</b>	<b>3,81</b>
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	23,3	25	<b>3,88</b>	<b>6,81</b>	14,9	85	0,55	0,22	16,2	80	0,64	0,01	20,1	72	0,57	0,03
ХПК	193	34	0,62	0,26	153	42	0,44	-0,05	126	38	0,11	0,08	153	43	<b>1,40</b>	<b>1,22</b>
ГК	11,7	53	<b>1,01</b>	0,62	9,36	45	-0,07	-0,30	7,01	56	0,77	0,10	8,39	59	0,43	-0,02
ФК	100	36	0,02	-0,19	79,4	34	-0,16	0,07	63,2	40	0,90	0,67	74,5	39	0,19	-0,11
CO <sub>2</sub>	52,5	46	0,93	0,50	51,4	41	0,65	0,10	34,6	47	<b>1,91</b>	<b>2,11</b>	40,1	39	0,55	-0,11
C <sub>орг</sub>	76,2	32	0,60	0,09	60,0	28	<b>1,43</b>	0,98	49,4	36	0,88	0,40	58,5	40	<b>1,65</b>	<b>1,42</b>
Минерализация	21,9	45	0,60	-0,12	21,4	85	<b>2,13</b>	<b>2,11</b>	15,8	56	<b>2,06</b>	<b>2,11</b>	21,2	54	<b>1,47</b>	0,76
Число проб	45				46				45				46			

*Примечание:* X – среднееголетнее значение концентрации компонента, мг/л; ХПК, мгО/л; Cv – коэффициент вариации, %; S = Cs<sub>i</sub>/Cs<sub>кр</sub>, где Cs<sub>i</sub> – коэффициент асимметрии; Cs<sub>кр</sub> – критическое значение коэффициента асимметрии; Cs<sub>кр</sub> = 1,04; E = E<sub>i</sub>/E<sub>кр</sub>, где E<sub>i</sub> – эксцесс; E<sub>кр</sub> – критическое значение эксцесса; жирным обозначено превышение критических значений, E<sub>кр</sub> = 3,10.

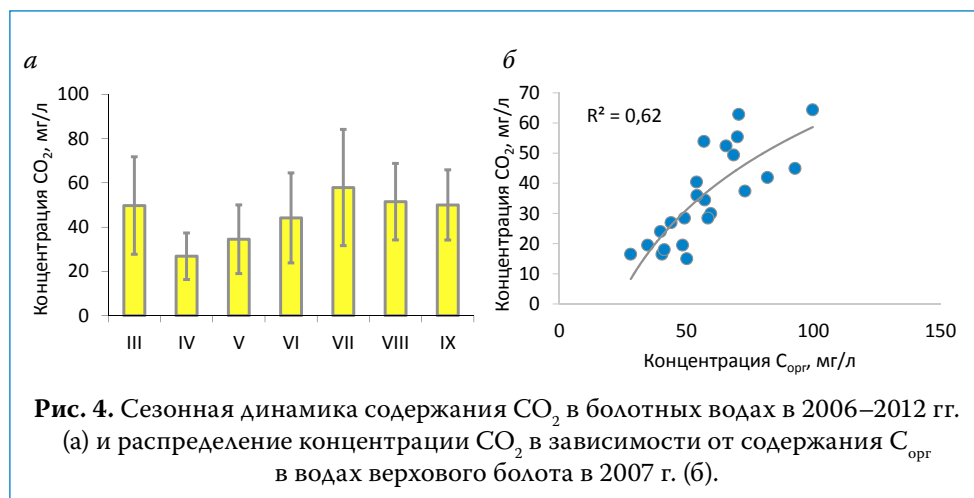
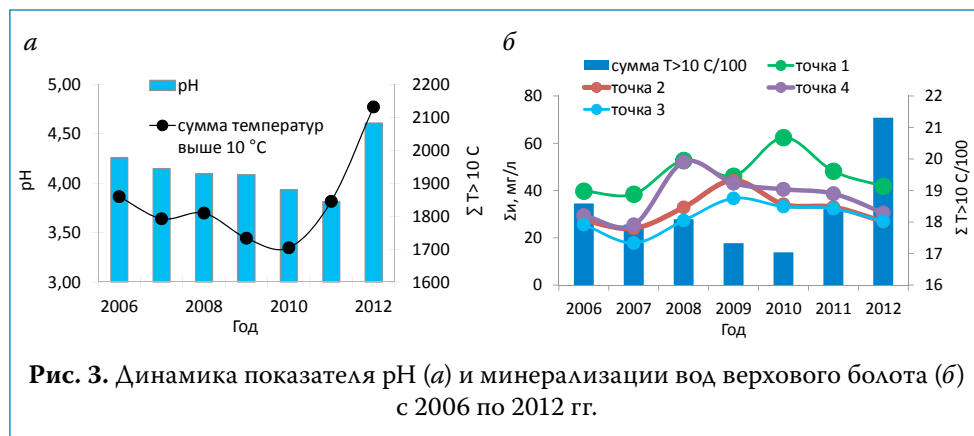
сфагнового и осоково-сфагнового микроландшафтов (точка 2, 3) и произошло снижение минерализации вод сосново-кустарничково-сфагновых микроландшафтов (точка 1, 4) при разбавлении атмосферными осадками.

Отличительная особенность химического состава вод верхового болота – высокое содержание углекислого газа. Главным источником CO<sub>2</sub> в водах



болот являются процессы биохимического распада и окисления органических остатков, о чем свидетельствует корреляционная зависимость между содержанием  $\text{CO}_2$  и концентрацией  $C_{\text{орг}}$  в водах исследуемого болота (рис. 4). Согласно [29], при значительном содержании органического вещества раствор является перенасыщенным углекислым газом по отношению к атмосферному  $\text{CO}_2$ .

Пересыщение болотных вод  $\text{CO}_2$  возрастает по мере увеличения содержания органического вещества, что, в свою очередь, приводит к увеличению его эмиссии в атмосферу [29]. Средняя концентрация  $\text{CO}_2$  за период наблюдений в водах верхового болота составила 44,7 мг/л, а динамика концентраций во многом повторяет изменение суммы температур приземного слоя воздуха выше 10 °С (рис. 4).



Растворенный кислород в водах верхового болота присутствует в течение всего вегетационного периода – среднее содержание  $O_2$  составляет 2,29 мг/л, максимальные концентрации отмечаются в период снеготаяния. Содержание растворенного кислорода определяется соотношением интенсивности процессов окисления органических веществ и абсорбции его из атмосферы. Низкие концентрации обусловлены практически полным расходом кислорода на окисление органических веществ [27].

В катионном составе вод верхового болота доминируют ионы  $Ca^{2+}$  и  $Mg^{2+}$ , при этом в водах высокого ярама (точка 1) преобладают в основном ионы  $Ca^{2+}$ . Менее стабильным является катионный состав низкого ярама (точка 2), топи (точка 3) и высокого ярама (точка 4), в котором преобладают то ионы  $Mg^{2+}$ , то ионы  $Ca^{2+}$ . Средняя концентрация  $Ca^{2+}$  в водах верхового болота составляет 6,01 мг/л и изменяется от 0,90 до 17,6 мг/л (рис. 5). Статистически значимая наиболее тесная корреляционная зависимость между содержанием  $Ca^{2+}$  и минерализацией вод отмечается в средний по водности 2010 г. и многоводный 2011 г., коэффициент корреляции изменяется от 0,63 до 0,99 в зависимости от пункта отбора проб. Магний по своим химическим свойствам близок к кальцию, но миграция этих элементов протекает по-разному [28]. Средняя концентрация  $Mg^{2+}$  составляет 3,32 мг/л и изменяется от 0,27 до 13,5 мг/л. Взаимосвязь между содержанием  $Mg^{2+}$  и минерализацией вод верхового болота выражена слабо, т. к. его поступление в болотные воды связано с ростом и развитием болотных растений (рис. 5). В болотных водах низкой минерализации ион  $Na^+$  чаще всего занимает третье место по концентрации среди главных ионов. Однако в водах верхового болота он уступает также  $NH_4^+$  и  $Fe_{\text{общ}}$ .

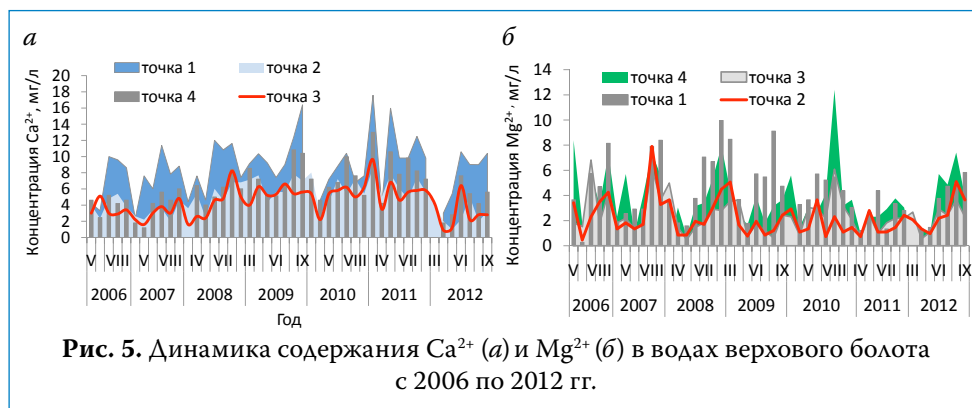


Рис. 5. Динамика содержания  $Ca^{2+}$  (а) и  $Mg^{2+}$  (б) в водах верхового болота с 2006 по 2012 гг.

Средняя концентрация ионов  $Na^+$  в водах верхового болота составляет 1,2 мг/л и изменяется от 0,015 до 6,7 мг/л. Концентрация ионов  $Na^+$  прак-

тически всегда превышает концентрацию ионов  $K^+$ , однако содержание  $K^+$  в отдельные периоды может возрасти, превышая  $Na^+$  (рис. 6). В основном ионы калия содержатся в незначительных концентрациях – 0,76 мг/л. Возрастание концентраций ионов  $K^+$  определяется тем, что химический состав болотных вод формируется в тесной связи с биологическими процессами, происходящими в деятельном слое торфяной залежи:  $K^+$  активно поглощается растениями и включается в биологический круговорот, принимает активное участие в фотосинтезе, влияет на обмен углеводов, азота и фосфора в растениях. После отмирания растительных остатков накопленный растениями  $K^+$  поступает в болотные воды, что и приводит к повышению его концентраций. Повышение концентраций  $K^+$  в болотных водах наблюдается, как правило, в теплообеспеченные периоды вегетационного периода, а также весной в результате трансформации растительных остатков за зимний период.

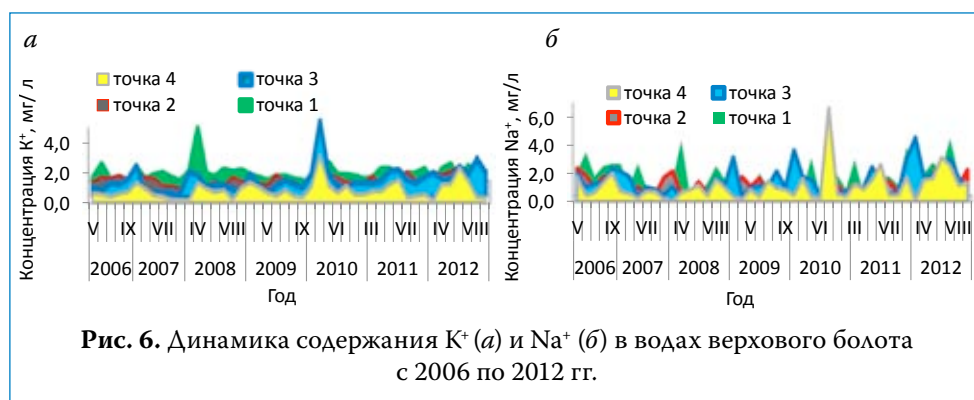


Рис. 6. Динамика содержания  $K^+$  (а) и  $Na^+$  (б) в водах верхового болота с 2006 по 2012 гг.

Распределение концентраций железа в водах верхового болота характеризуется изменением значений от 0,31 до 24,1 мг/л, среднее содержание  $Fe_{\text{общ}}$  составляет 2,07 мг/л. Как показали исследования [30], количество подвижного железа определяется не валовым содержанием, а условиями реакции среды и увлажнения. Присутствие гуминовых кислот в болотных водах определяет повышенную миграционную способность железа. В водах верхового болота наблюдается статистически значимая корреляционная зависимость между содержанием  $Fe_{\text{общ}}$  и концентрацией фульвокислот (рис. 7).

Специфические черты гидрохимического облика верховых болот определяются частым возникновением анаэробных условий в торфяной залежи, приводящих к формированию восстановительной обстановки, которая регламентирует формы и миграционную способность макро- и микрокомпонентов болотных вод.

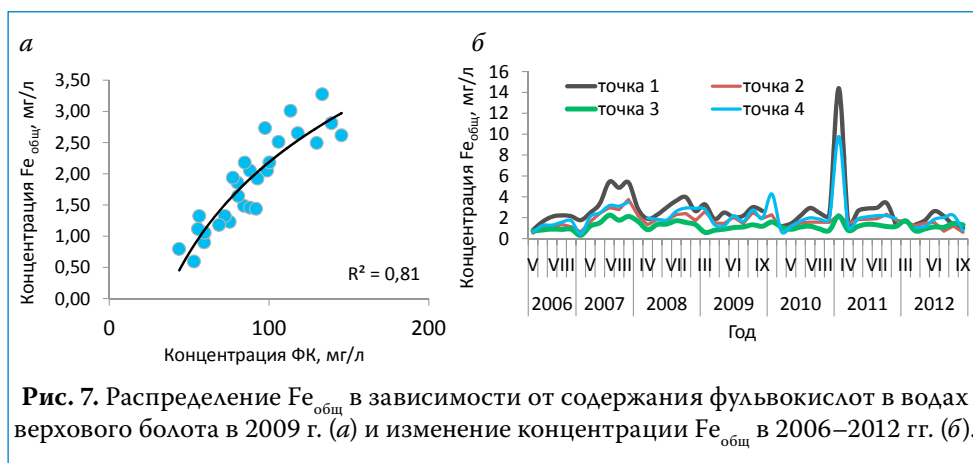


Рис. 7. Распределение  $Fe_{общ}$  в зависимости от содержания фульвокислот в водах верхового болота в 2009 г. (а) и изменение концентрации  $Fe_{общ}$  в 2006–2012 гг. (б).

Для верхового болота характерны повышенное содержание восстановленных форм (аммонийный азот) на фоне низкого содержания окисленных форм (нитратный азот) [16]. Наблюдается положительная корреляционная связь между содержанием в водах  $NH_4^+$  и концентрацией  $NO_3^-$ . Высокие концентрации ионов  $NH_4^+$  в водах верхового болота наблюдаются в течение всего вегетационного периода (от 0,89 до 16,7 мг/л), концентрация  $NO_3^-$  незначительна, колеблется от 0,013 до 2,24 мг/л (рис. 8).

Содержание  $HCO_3^-$  в водах верхового болота изменяется от 0 до 159,9 мг/л и в среднем составляет 18,6 мг/л. В анионном составе вод высокого рьяма (точка 1) гидрокарбонат ион преобладает, тогда как в водах низкого рьяма (точка 2), осоково-сфагнуовой топи (точка 3) и высокого рьяма (точка 4) зачастую отсутствует (рис. 9).

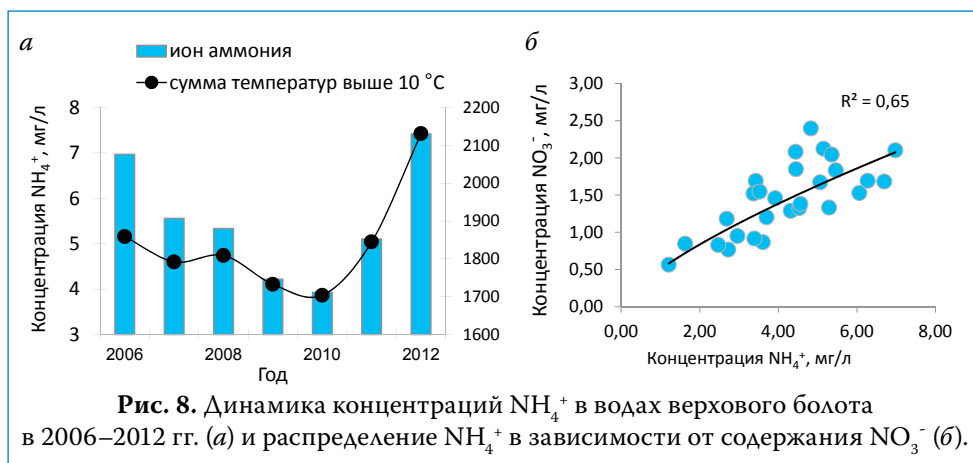


Рис. 8. Динамика концентраций  $NH_4^+$  в водах верхового болота в 2006–2012 гг. (а) и распределение  $NH_4^+$  в зависимости от содержания  $NO_3^-$  (б).

В сезонной динамике максимальные концентрации  $\text{HCO}_3^-$  в болотных водах отмечаются в марте, в дальнейшем при разбавлении талыми водами наблюдается снижение содержания аниона и далее постепенное увеличение в августе-сентябре. В середине теплого периода года болотные воды, как правило, характеризуются минимальными концентрациями  $\text{HCO}_3^-$  за счет сильного подкисления раствора при интенсивной трансформации органического вещества торфяной залежи и увеличения содержания гуминовых и фульвокислот.

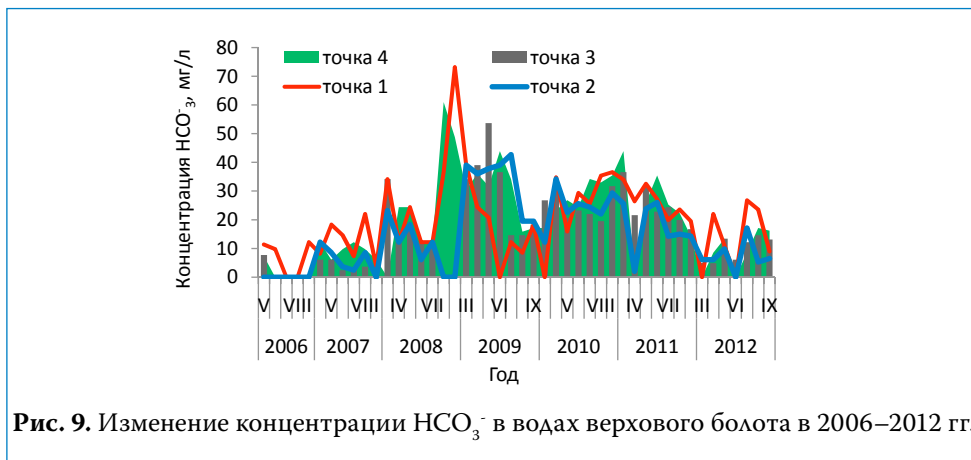
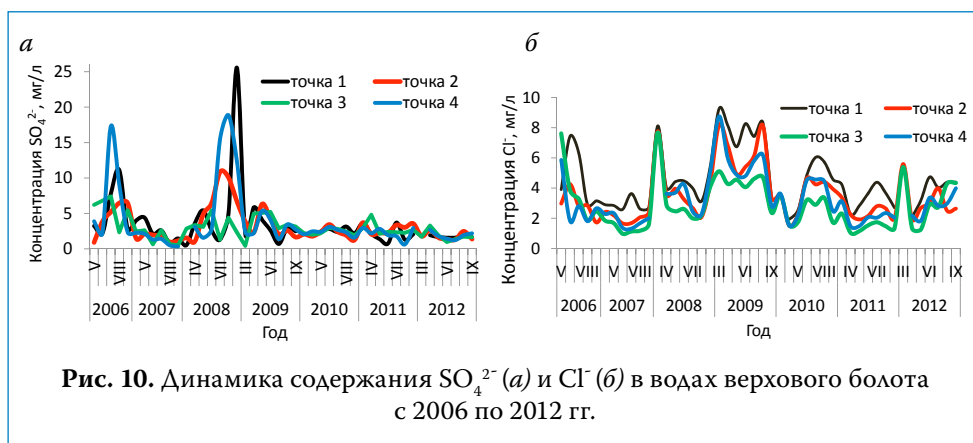


Рис. 9. Изменение концентрации  $\text{HCO}_3^-$  в водах верхового болота в 2006–2012 гг.

Средняя концентрация  $\text{SO}_4^{2-}$  в водах верхового болота равна 4,0 мг/л (рис. 10). Появление анаэробных условий в торфяной залежи верхового болота приводит к снижению концентрации  $\text{SO}_4^{2-}$ . Как известно, в анаэробной среде сульфатные ионы становятся неустойчивыми и восстанавливаются до сероводорода.

Основная роль в этом процессе принадлежит сульфатредуцирующим бактериям, развивающим свою деятельность при наличии органического вещества [27]. Содержание  $\text{Cl}^-$  в водах верхового болота колеблется от 0,98 до 9,26 мг/л и в среднем составляет 3,52 мг/л. Закономерности изменений концентраций в пределах пунктов отбора проб весьма отличаются, хотя в целом также определяются условиями среды.

Анализ сезонной и многолетней динамики органических веществ в болотных водах проводился на основе оценки ХПК вод, концентраций  $\text{C}_{\text{орг}}$ . Согласно проведенным исследованиям, среднее значение ХПК верхового болота за период наблюдений составляет 166 мгО/л. Сезонные колебания ХПК вод и концентраций  $\text{C}_{\text{орг}}$  характеризуются снижением в апреле-мае вследствие разбавления болотных вод талыми водами. В летний период и в сентябре отмечается увеличение концентраций органических веществ с



достижением максимальных значений и резким уменьшением при выпадении атмосферных осадков и увеличении уровня болотных вод. Повышение концентраций в летний и осенний периоды вызвано активизацией процессов разложения и трансформации растительных остатков и торфа.

Таким образом, анализ индексов сезонности показал, что в течение вегетационного периода отмечается два значимых максимума сезонной волны химического состава болотных вод. Первый максимум связан с концентрированием раствора в марте перед началом периода снеготаяния в условиях практически полного отсутствия доступа кислорода. При этом возрастает величина рН, минерализация и содержание минеральных компонентов состава  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Fe}_{\text{общ}}$ , а также активно идет процесс гумификации, о чем свидетельствует резкое возрастание концентраций гуминовых и фульвокислот,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{C}_{\text{орг}}$  и величин ХПК. Формирование второго максимума определяется процессами трансформации органических остатков верхних слоев торфяной залежи при снижении уровней болотных вод с июля по сентябрь: отмечается увеличение рН, минерализации вод, величин ХПК, концентраций минеральных компонентов  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  и большей частью биогенных элементов состава болотных вод  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Fe}_{\text{общ}}$ , а также гуминовых веществ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{C}_{\text{орг}}$ . Анализ сезонной волны концентраций  $\text{K}^+$  за многолетний период показал достоверное увеличение индексов сезонности во всех точках в апреле.

В пределах верхового болота отмечается закономерное увеличение концентраций компонентов в водах в ряду: осоково-сфагновая топь (точка 3), сосново-кустарничково-сфагновый микроландшафт (высокий рям, точка 4), сосново-кустарничково-сфагновый микроландшафт (низкий рям, точка 2), сосново-кустарничково-сфагновый микроландшафт (высокий рям, точка 1). Химический состав вод и закономерности сезонной динамики высокого рьяма

(точка 1) определяются преимущественно процессами взаимодействия с торфяной залежью, а основные компоненты в болотные воды поступают в процессе ее трансформации и минерализации растительных остатков. Химический состав болотных вод сосново-кустарничково-сфагнового микроландшафта (точка 4) имеет сходные закономерности, а отличается тем, что формируется в условиях интенсивного стекания вод с вышерасположенных участков болотного массива, что приводит к снижению минерализации вод, которые по составу становятся схожи с водами сосново-кустарничково-сфагнового микроландшафта (точка 2), что в целом подтверждает кластерный анализ. Химический состав вод сосново-кустарничково-сфагнового микроландшафта (точка 2) частично формируется под влиянием атмосферных осадков, частично под влиянием фильтрации маломинерализованных вод с вышерасположенных участков болотного массива, трансформации растительных остатков и процессов миграции элементов при развитии растительности. Химический состав болотных вод и гидрохимический режим осоково-сфагновой топи (точка 3) складываются под существенным влиянием атмосферных осадков и поступления маломинерализованных вод с вышерасположенных участков болотного массива.

Гидрохимический режим вод верхового болота формируется под воздействием совокупности факторов окружающей среды, важнейшими из которых являются температура воздуха, влажность торфяной залежи, уровень болотных вод. Отмечено, что при росте суммы температур приземного слоя воздуха выше 10 °С в водах верхового болота растет величина рН, содержание  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Fe}_{\text{общ}}$ , органических веществ (гуминовых и фульвокислот,  $\text{C}_{\text{орг}}$ ). Отмечается обратная корреляционная зависимость минерализации вод от суммы активных температур.

Многолетние исследования показали, что максимальное содержание основных макрокомпонентов ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ) в болотных водах зафиксировано в многоводный 2009 г. и в средний по водности 2010 г. Максимальные концентрации ионов  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , а также биогенных элементов  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Fe}_{\text{общ}}$  и органических веществ в водах верхового болота наблюдались в наиболее теплообеспеченные и маловодные 2006 и 2012 гг. В теплообеспеченные периоды идет интенсивная трансформация растительных остатков, их минерализация, в результате которой в дальнейшем, после подъема уровня болотных вод, происходит поступление освободившихся при разложении остатков растений минеральных веществ.

### ВЫВОДЫ

По результатам проведенных исследований установлено, что воды верхового болота кислые и слабокислые, маломинерализованные, с повышенным содержанием органического вещества,  $\text{Fe}_{\text{общ}}$  и  $\text{NH}_4^+$ . Отличительной

особенностью гидрохимического режима вод верхового болота является трансформация химического состава с изменением класса, группы и типа вод в течение года. Специфическим является и газовый режим вод верхового болота с повышенным содержанием  $\text{CO}_2$  до 131,6 мг/л. Растворенный кислород присутствует в болотных водах с апреля по сентябрь в небольших концентрациях. Исследуемые болотные микроландшафты в сравнении с опубликованными данными по европейской территории России отличаются преобладанием гидрокарбонатного или хлоридного класса вод. При этом болотные воды характеризуются близкими в сравнении с болотами европейской территории России величинами минерализации и концентрации компонентов, схожими тенденциями в гидрохимическом режиме (с максимумом концентраций в предпаводочный период и в летне-осеннюю межень), общими закономерностями в увеличении коэффициентов вариации химического состава от центра к периферии болотного массива.

Проведенный кластерный анализ показал, что в пределах северо-восточной части Васюганского болота по характеристикам химического состава болотных вод можно выделить три кластера. Достоверные различия химического состава вод болотных микроландшафтов отмечаются по величине минерализации, содержанию ионов  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}_{\text{общ}}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ , гуминовых и фульвокислот,  $\text{C}_{\text{орг}}$  и  $\text{CO}_2$ . В пределах исследованного верхового болота отмечается закономерное увеличение концентраций при продвижении от центральных частей к окраинам.

Гидрохимический режим верхового болота характеризуется увеличением концентрации основных макрокомпонентов в марте вследствие концентрирования при промерзании торфяной залежи, снижением содержания элементов в водах в апреле в период снеготаяния, увеличением в июне с максимумом концентраций в июле. В августе отмечается некоторое снижение (до уровня июня-мая) содержания минеральных и органических веществ, а в сентябре – повторное увеличение содержания компонентов.

В настоящее время исследования гидрохимического режима вод болот приобретают особую важность в условиях усиления антропогенной нагрузки на природные экосистемы. Изучение вопросов устойчивости и реакции болот на изменение условий окружающей среды, определение фоновых концентраций химических элементов в болотных водах невозможно без проведения длительных и непрерывных наблюдений в рамках комплексного мониторинга заболоченных территорий.

Значимые различия в химическом составе вод одного болотного массива – северо-восточной части Васюганского болота – позволили сделать заключение, что для определения фоновых концентраций химических элементов в водах болот отбор проб необходимо производить в середине



сезона вегетации (июль), когда их состав близок к среднему за теплый период года, на расстоянии не менее 500–700 м от границ болотного массива. Следует выбирать типичные и наиболее распространенные на данном болоте микроландшафты в зависимости от типа его водно-минерального питания. При расчете НДС важно учитывать существенное увеличение концентраций компонентов в марте, а перечень фоновых показателей химического состава для верховых болот должен включать типоморфные элементы –  $\text{Fe}_{\text{общ}}$ ,  $\text{NH}_4^+$ , гуминовые вещества, а также рН, ХПК.

Длительные многолетние наблюдения показали, что особое значение имеет выбор методик количественного химического анализа, учитывающих особенности болотных вод – высокую цветность, большое содержание органических веществ природного происхождения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Калюжный И.Л., Левандовская Л.Я.* Гидрохимический режим и химический состав вод олиготрофных болотных массивов // Труды ГГИ. 1974. Вып. 222. С. 99–118.
2. *Калюжный И.Л.* Гидрохимический режим и химический состав вод мезоолиготрофных болотных массивов Кольского полуострова // Вестник Кольского научного центра РАН. № 3 (26). 2016. С. 114–125.
3. *Калюжный И.Л.* Общие черты формирования гидрохимического режима и химического состава вод эвтрофных болотных массивов // Водное хозяйство России. № 3. 2016. С. 30–46.
4. *Савичев О.Г.* Геохимические показатели болотных вод в таежной зоне Западной Сибири // Известия Российской академии наук. Сер. геогр. 2015. № 4. С. 47–57.
5. *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. 73 (11). P. 7329–7341.
6. *Савичев О.Г., Мазуров А.К., Семилетов И.П., Базанов В.А., Гусева Н.В., Хвощевская А.А., Наливайко Н.Г.* Гидрогеохимические условия формирования олиготрофных болотных экосистем // Известия Российской академии наук. Сер. геогр. 2016. № 5. С. 60–69.
7. *Домаренко В.А., Савичев О.Г., Перегудина Е.В.* Особенности распределения химических элементов в болотных экосистемах Восточного Васюганья // Разведка и охрана недр. 2017. № 8. С. 50–54.
8. *Matveenko I.A., Savichev O.G., Bazanov V.A., Ivanova Ye.V.* Spatial-Temporal Regularities in Changing Chemical Composition of Bog Waters in Taiga Zone of Western Siberia // *Procedia Chemistry*. 15, 2015. P. 206–212.
9. *Савичев О.Г., Шмаков А.В.* Вертикальная зональность и внутригодовые изменения химического состава вод Тимирязевского болота (Томск, Западная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 320. № 1. С. 156–161.

10. Харанжевская Ю.А., Воистинова Е.С., Иванова Е.С. Химический состав и качество болотных вод в бассейне р. Чая // Сибирский экологический журнал. 2011. № 1. С. 137–145.
11. Воистинова Е.С., Харанжевская Ю.А. Региональная характеристика химического состава болотных вод Томской области // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Т. 16. № 1(4). 2014. С. 942–946.
12. Olid C., Bindler R, Nilsson M. B., Eriksson T., Klaminder, J. Effects of warming and increased nitrogen and sulfur deposition on boreal mire geochemistry. Applied Geochemistry. 2017. Vol. 78. P.149–157.
13. Bingqi Zhu, Jingjie Yu, Xiaoguang Qin, Patrick Rioual, Heigang Xiong Climatic and geological factors contributing to the natural water chemistry in an arid environment from watersheds in northern Xinjiang, China // Geomorphology. 2012. P. 102–114.
14. Avagyan A., Runkle B. R.K., Hartmann J., Kutzbach L. Spatial variations in pore-water biogeochemistry greatly exceed temporal changes during baseflow conditions in a boreal river valley mire complex, Northwest Russia // Wetlands. 2014. Vol. 34. P. 1171–1182.
15. Wertebach T.-M., Knorr K.-H., Lordieck M., Tretiakov N., Blodau C., Hölzel N., Kleinebecker T. Relationships between vegetation succession, pore water chemistry and CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> production in a transitional mire of Western Siberia (Tyumen Oblast) // Wetlands, October 2016. Vol. 36, Iss. 5. P. 863–874.
16. Черняев А.М., Черняева Л.Е., Еремеева М.Н. Гидрохимия болот. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 429 с.
17. Ларина Г.В., Инишева Л.И. Химический состав болотных вод Алтайской горной страны // Современные проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии Евразии. Национальный исследовательский Томский политехнический университет. 2015. С. 437–440.
18. Здвижков М.А. Гидрогеохимия Васюганского болота: автореф. дисс. ... канд. геол.-минер. наук. Томск, 2005. 187 с.
19. Shvartsev, S. L.; Serebrennikova, O. V.; Zdvizhkov, M. A. et al. Geochemistry of wetland waters from the lower Tom basin, Southern Tomsk oblast // Geochemistry International, 2012. Vol. 50. Iss. 4. P. 367–380.
20. Наймушина О.С. Геохимическая эволюция природных вод нижней части бассейна реки Томи: автореф. дисс. ... канд. геол.-минер. наук. Томск, 2014. 169 с.
21. ФР.1.31.2005.01580. Методика выполнения измерений содержания свободной углекислоты в пробах питьевых и природных вод. Титриметрический метод.
22. Лурье Ю.Ю. Унифицированные методы анализа вод. М.: Наука, 1973. 376 с.
23. СТП 0493925-008-93. Определение углерода водорастворимых соединений по методу Тюрина в модификации СибНИИТ.
24. Берестнева О.Г., Муратова Е.А., Уразаев А.М. Компьютерный анализ данных. Томск: ТПУ, 2003. 204 с.
25. Чекотовский Э.В. Графический анализ статистических данных в Microsoft Excel 2000. М.: ИД «Вильямс», 2002. 464 с.
26. Потапова Т.М., Новиков С.М. Оценка антропогенных изменений химического состава болотных вод и стока растворенных веществ с территории естест-

- венных и мелиорированных верховых болот // Вестник СПбГУ. 2006. Сер. 7. Вып. 2. С. 85–95.
27. *Алекин О.А.* Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоиздат, 1953. 295 с.
28. *Никаноров А.М.* Гидрохимия. СПб.: Гидрометеоиздат, 2001. 444 с.
29. *Кремлева Т.А.* Геохимические факторы устойчивости водных систем к антропогенным нагрузкам: автореф. дисс. ... д-ра хим. наук. Москва, 2015. 260 с.
30. *Природные режимы средней тайги Западной Сибири.* Новосибирск: Наука, 1977. 304 с.

**Сведения об авторах:**

Воистинова Елена Сергеевна, научный сотрудник, Сибирский НИИ сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агроботехнологий РАН; Россия, 634050, г. Томск, Гагарина, 3; e-mail: elenavoistinova@yandex.ru

Харанжевская Юлия Александровна, канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник, Сибирский НИИ сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агроботехнологий РАН; доцент, кафедра гидрологии, Национальный исследовательский Томский государственный университет; Россия, 634050, г. Томск, Гагарина, 3; e-mail: kharan@yandex.ru

Синюткина Анна Алексеевна, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник, Сибирский НИИ сельского хозяйства и торфа – филиал Сибирского федерального научного центра агроботехнологий РАН; Россия, 634050, г. Томск, Гагарина, 3; e-mail: ankalaeva@yandex.ru