

УДК 556.114

ОПЫТ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛЕСО-ТОРФЯНЫХ ПОЖАРОВ НА ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭУТРОФНЫХ БОЛОТ

© 2021 г. Т. Т. Ефремова*,[@], А. В. Пименов*, С. П. Ефремов*, А. Ф. Аврова*, Д. Ю. Ефимов*

*Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН — Обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН,
Академгородок, 50/28, Красноярск, 660036 Россия

[@]E-mail: efr2@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 09.07.2019 г.

После доработки 19.05.2020 г.

Принята к публикации 27.05.2020 г.

Впервые на примере ключевого объекта заторфованных речных долин Кузнецкого Алатау, занятых ельниками, показано, что вследствие лесо-торфяных пожаров болотные воды четко дифференцируются по содержанию главных ионов и объективно формируют три группы: 1 — воды исходного типа водно-минерального питания (пресные, мягкие), 2 — воды массива, пройденного пожаром средней силы (пресные, жесткие), 3 — сильным пожаром (слабосолонцеватые, очень жесткие). Наибольшей дискриминирующей мощностью (95%) в определении болотных вод обладают ионы магния и гидрокарбонаты. Болотные воды постпирогенного торфяного массива не утрачивают однопородное с водами исходного типа соотношение главных ионов и сохраняют гидрокарбонатный кальциево-магниевый состав.

DOI: 10.31857/S1026347021050073

Торфяные пожары являются мощным экзогенным фактором влияния на состояние болотных экосистем. Болота и заболоченные леса, включенные в третью группу природной пожарной опасности, подвержены циклическому воздействию пожаров (Фуряев, 1970). Установлены следующие виды почвенно-торфяных пожаров: подземные, открытые и/или комбинированные (Курбатский, 1962; Волокитина, 1985). Для почвенных и подземных пожаров наиболее характерно беспламенное горение. Для понимания закономерностей послепожарной сукцессии болотных экосистем необходимо принимать во внимание последствия многообразных взаимодействий целого ряда факторов, которые влияют на условия среды, определяя векторы микроэволюционных процессов (Санников, 1981; Wieder *et al.*, 2009). В той или иной мере влияние пожаров изучено на отдельные факторы гидроморфных местообитаний: состояние древостоя в болотных лесах (Пьявченко, 1978; Ефремова, Ефремов, 1994; Efremova, Efremov, 1996), на функционирование фитоценозов (Коптева, Купцова, 2016), свойства и плодородие пирогенно-торфяных почв (Зайдельман и др., 2003; Банников и др., 2004), на трансформацию органического вещества торфа (Ефремова, Ефремов, 2006; Turetsky *et al.*, 2015; Глухова, Сирин, 2018), на микротопографию торфяников (Benscoter *et al.*, 2015).

Вместе с тем практически не изученной остается роль пирогенного фактора в преобразовании химического состава болотных вод. Известно, что любые перемены в среде обитания на болотах наиболее тесно связаны с изменением их водно-минерального питания, определяющего биогеохимическую эволюцию гидроморфных экосистем, циклы почвообразования, естественный отбор экобиотипов растений и адаптацию древесных пиропитов.

Цель настоящей работы — объективно оценить неоднородность химического состава поверхностных вод болотных ельников эутрофного ряда развития в связи с лесоторфяными пожарами, используя методы многомерного статистического анализа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследовали лесоболотные экосистемы восточного макросклона Кузнецкого Алатау (Республика Хакасия). В структуре лесов этой территории широко распространены болотные ельники по долинам рек, во влажных распадках и падах, по подножьям и пологим склонам гор на участках выклинивания ключевых вод. Из общего числа 18 типизированных лесных болот в качестве ключевого объекта выбрали торфяной массив в долине реки Тунгузюль (приток р. Белый Июс) на абсолютной высоте 622 м. Торфяник площадью 1,8 тыс. га характеризуется малой мощностью (70–80 см) и сложен

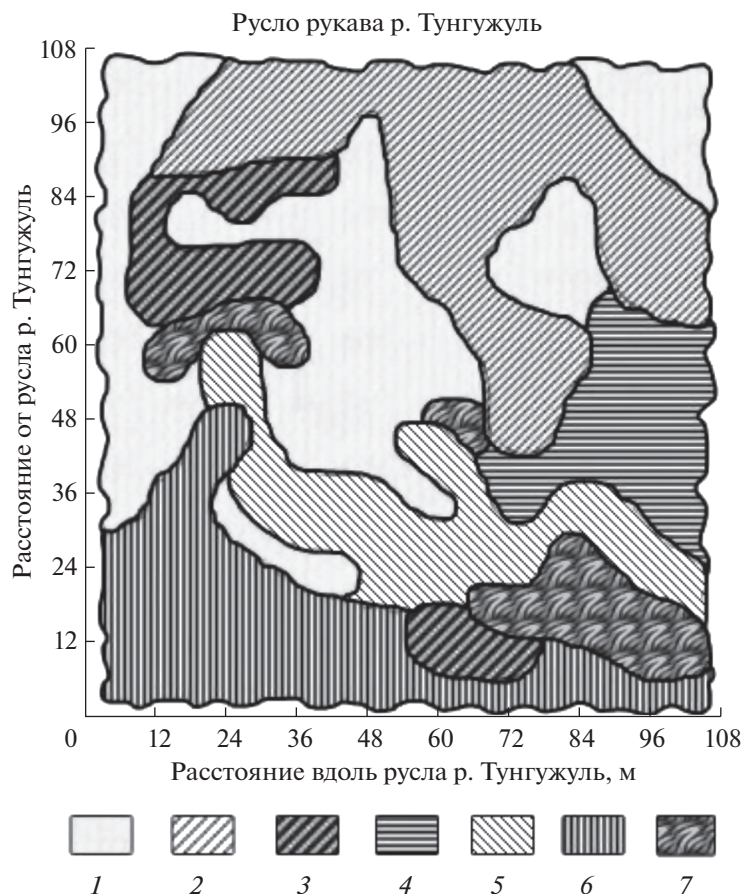


Рис. 1. Структура напочвенного растительного покрова в ельнике зеленомошно-гипновом. Условные обозначения: 1 – *Tomenthypnum nitens* (Hedw.) Loeske, 2 – *Tomenthypnum nitens* (Hedw.) Loeske) + (*Aulacomnium turgidum* (Wahlenb.) + *Aulacomnium palustre* (Hedw.) Schwaegr.), 3 – *Hylocomium splendens* (Hedw.) Br. Sch. et Ymb., 4 – *Hylocomium splendens* (Hedw.) Br. Sch. et Ymb. + (*Aulacomnium turgidum* (Wahlenb.) + *Aulacomnium palustre* (Hedw.) Schwaegr.), 5 – *Aulacomnium turgidum* (Wahlenb.) + *Aulacomnium palustre* (Hedw.) Schwaegr., 6 – *Drepanocladus uncinatus* (Hedw.), 7 – *Helodium Blandowii* (Web. et Mohr) Warnst.

почвами эутрофного типа – ТЕ-ТТ (Hypereutric Histic Histosol) (Классификация ..., 2004; Мировая реферативная ..., 2017). Большую часть года он проморожен до минерального дна. Сезонная глубина залегания мерзлоты активно влияет на уровни стояния грунтовых вод: в начале июня 11–20 см, в конце августа 45–50 см.

Заболоченная долина занята разновозрастным (72–410 лет) зеленомошно-гипновым ельником (*Picea obovata* Z.) Va класса бонитета. Степень проективного покрытия мхами составляет 95%. Структура растительного покрова представлена на рис. 1. Стволы и ветви еловых деревьев густо обросли “космами” кустистых лишайников – *Evernia divaricata* (L.) Ach., *Evernia esorediosa* (Müll. Arg.) DR., *Usnea cavernosa* Tuck., *Usnea dasypoga* (Ach.) Nyl., *Usnea longissima* Ach.

Торфяной массив сухой весной 1999 г. пройден крупным пожаром (площадь более 200 га) вблизи д. Усть-Тунгужуль. Возгорание вызвано

развитием низового пожара на высокотравном лугу подножья горы Ала-Таг. На болоте огонь перешел в верховой пожар благодаря наличию в ельнике активных проводников горения – эпифитных лишайников. По ним пламя активно охватывало кроны деревьев, смолистую хвою, вызывая обгорание стволов и ветвей, что приводило к развитию почвенно-подземного пожара. Практически полное выпадение из состава древостоя ели, которая относится к числу наиболее огнестойких темнохвойных видов (Санников, 1981), дает основание предполагать, что пожар по скорости распространения оказался устойчивым, по интенсивности горения – средним и сильным.

Ко времени обследования в сентябре 2018 г. (т.е. спустя 20 лет) растительность пожарища представлена березняком (*Betula pubescens* Ehrh.) кустарниковым осоково-зеленомошным, относящимся к группе кратковременно-производных постпирогенных травяных лесов. Возраст древо-

Таблица 1. Геоботаническая характеристика пиролого-экологического профиля

Индексация объектов	Растительные сообщества
П1 1, 2	Березовый кустарниково (<i>Salix rhamnifolia</i> + <i>Ribes nigrum</i> + <i>Dasiphora fruticosa</i>) – дернистоосоково (<i>Carex cespitosa</i>) – зеленомошный (<i>Aulacomnium palustre</i>) лес
П2 3, 4	Березовый кустарниково (<i>D. fruticosa</i> + <i>S. rhamnifolia</i>) – дернистоосоково (<i>C. cespitosa</i>) – зеленомошный (<i>A. palustre</i>) лес
П3 5, 6	Березовый кустарниково (<i>D. fruticosa</i>) – дернистоосоковый (<i>C. cespitosa</i>) лес
П4 7, 8	Березовый кустарниково (<i>D. fruticosa</i> + <i>Salix pentandra</i>) – хвощово (<i>Equisetum pratense</i>) – дернистоосоково (<i>C. cespitosa</i>) – зеленомошный (<i>Hylocomium splendens</i>) лес
П5 9, 10	Березовый кустарниково (<i>D. fruticosa</i> + <i>S. rhamnifolia</i>) – дернистоосоково (<i>C. cespitosa</i>) – зеленомошный (<i>A. palustre</i>) лес

Примечание. П1–П5 – номера пробных площадей, 1–10 – номера участков.

стоя – 17–20 лет. Флористический состав на 87% представлен сосудистыми растениями. Почвы – пироторфяные эуτροφного типа (TEpиг-ТТ). Вдоль русла р. Тунгужуль на расстоянии 25–35 м от берегового вала разбили эколого-пирологический профиль (полигон) протяженностью 250–300 м. В его пределах организовали пять примерно равноудаленных пробных площадей (10 × 10 м) и на каждой сообразно доминирующим растительным группировкам выделено по 2 участка. Характеристика растительных сообществ каждой пробной площади приведена в табл. 1. По видовому богатству участки слабо различаются между собой, что характеризует согласованность процессов восстановительной динамики.

На химический анализ отобрана 31 проба поверхностных болотных вод. Выкапывали торфяной монолит размером 35 × 35 × 40 см и образовавшееся углубление (шурф) заполнялось водой, как правило, на утро следующего дня. Наиболее высоко (5–7 см) грунтовые воды стояли на пробных площадях П3 и П4, которые примыкают к заторфованной ложбине, наиболее низко на пр. пл П5 – 55 см, которая ближе других расположена к руслу р. Тунгужуль, на остальных – примерно на уровне 20 см. На каждом участке эколого-пирологического профиля заложено по 3–6 шурфа, на площади болотного ельника, не затронутого пожаром – 7. Не позднее 2–3 дней пробы вод поступали в аналитическую лабораторию. Определяли сумму концентраций главных ионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-), величину pH, а также содержание органического углерода. Выбор данных показателей обусловлен тем, что они характеризуют основополагающие особенности химического состава болотных вод. Аналитическую работу выполняли по руководству (Алекин и др., 1973). Болотные воды классифицировали согласно (Алекин, 1970; Перельман, Касимов, 1999).

Многомерный статистический анализ выполнен в программе STATISTICA 6.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По данным табл. 2, болотные воды эуτροφного долинного торфяного массива р. Тунгужуль относятся к классу нейтральных и слабощелочных, что соответствует нейтральным и слабощелочным ландшафтно-геохимическим условиям почвенных вод юга Центральной Сибири (Мирошников и др., 2003). По степени минерализации и составу ионов воды характеризуются как пресные и слабосолоноватые гидрокарбонатные кальциево-магниевые, бедные растворенным органическим веществом. Большинство химических показателей болотных вод отличаются значительным варьированием ($\text{Cv} > 34\%$) и формируют неоднородную совокупность, оценка по (Скворцова и др., 2015). Прежде чем приступить к формальной классификации вод в сходные по химическому составу группы, была выполнена ориентировочная оценка интенсивности пожара в пределах топо-экологического профиля.

Косвенные показатели силы огневого воздействия характеризовали по качеству торфяного субстрата и состоянию сухостоя.

Пироторф массива Тунгужуль после пожара средней силы представляет собой сильно-разложившиеся растительные остатки темно-бурого цвета с единичными вкраплениями углей, монолитного, плотного сложения 0.205–0.344 г/см³ (0.292 г/см³) с зачатками агрегированности и слабо выраженной пластичностью. Пироторф сильного пожара – темно-бурый, однородный, высокой пластичности органический субстрат повышенной уплотненности 0.347–0.374 г/см³ (0.360 г/см³) с обильными включениями древесных углей, серовато-сизых скоплений золы и хорошо оформ-

Таблица 2. Химический состав поверхностных болотных вод исходного типа водно-минерального питания за-торфованной долины р. Тунгузूल и участков залежи, пройденных пожаром

№ участка	Σ _и , мг/л	pH	C, мг/л	Катионы, мг/л					Анионы, мг/л		
				NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
Болотные воды исходного типа водно-минерального питания: географические координаты – 54°16'30.42'' N, 89°38'53.93'' E											
01	273.5	7.9	3.5	—	35.6	12.8	1	17.6	187.9	13.7	4.9
02	298.7	7.5	3.1	—	39.6	13.8	1.2	16.4	200.1	14.0	13.6
03	310.2	7.5	2.9	1.76	40.1	13.1	1.3	20.5	210.5	13.9	6.7
04	369.1	7.4	4.7	—	54.2	21.5	1.6	8.5	242.8	8.1	32.5
05	422.5	7.4	4.7	—	56.2	28.1	1.3	10.1	279.4	8.6	38.9
06	374.5	7.2	5.5	—	65.0	15.8	1.6	6.0	239.1	9.5	37.5
07	452.0	7.4	8.6	—	72.8	22.8	4.6	10.5	277.6	12.3	51.5
Болотные воды участков торфяного массива, пройденных пожаром											
Пробная площадь П1 – 54°14'30.60'' N, 89°36'03.10'' E											
1	631.9	7.4	9.6	1.48	107.0	29.8	1.0	14.1	453.8	8.8	15.9
	624.7	7.3	9.2	1.53	106.0	29.7	1.0	13.3	450.0	8.0	15.2
	635.5	7.5	9.8	1.45	101.5	29.8	1.1	15.2	460.0	10.0	16.5
2	621.4	7.5	5.9	1.06	112.0	26.9	0.3	10.3	436.2	13.6	21.0
	609.1	7.4	5.4	1.01	110.0	26.8	0.3	9.4	428.0	13.1	20.6
	633.9	7.6	6.2	1.10	115.0	27.0	0.4	11.0	444.0	14.0	21.4
Пробная площадь П2 – 54°14'29.00'' N, 89°36'03.00'' E											
3	922.3	7.6	10.8	1.25	108.0	64.8	0.2	32.1	672.7	12.3	30.9
	912.1	7.5	10.4	1.20	107.2	65.3	0.2	31.1	665.0	12.1	30.0
	930.4	7.7	11.1	1.31	108.8	64.3	0.2	33.5	678.0	12.5	31.7
4	1068.1	7.6	11.1	1.80	96.0	90.2	0.3	43.0	777.8	11.7	47.3
	1066.8	7.5	11.0	1.74	95.0	90.2	0.3	42.2	782.0	12.3	43.2
	1068.4	7.7	11.3	1.82	97.0	90.4	0.3	44.5	773.0	10.1	51.4
Пробная площадь П3 – 54°14'27.20'' N, 89°36'02.80'' E											
5	740.7	7.7	15.3	1.78	96.0	54.7	0.7	11.0	528.3	17.9	30.2
	758.1	7.6	14.1	1.72	94.0	58.6	0.7	13.3	535.6	18.4	35.8
	738.4	7.8	16.3	1.84	97.0	51.8	0.7	15.2	520.9	17.5	33.4
Пробная площадь П4 – 54°14'26.20'' N, 89°36'02.20'' E											
6	1120.8	7.5	13.0	1.52	126.0	82.1	0.4	31.3	757.0	10.1	112.4
	1120.5	7.4	14.1	1.47	125.0	81.7	0.4	30.5	761.3	9.9	110.3
	1121.5	7.6	11.9	1.56	127.0	82.6	0.4	32.7	752.7	10.2	114.4
7	897.6	7.8	11.1	1.65	120.0	65.3	0.3	24.0	574.0	12.3	100.0
	890.9	7.7	11.9	1.60	121.6	64.3	0.3	23.8	568.0	12.1	99.2
	903.4	7.9	10.4	1.69	118.4	66.2	0.3	25.0	579.0	12.3	100.4
Пробная площадь П5 – 54°14'24.70'' N, 89°35'59.40'' E											
8	711.8	7.5	12.3	2.13	106.4	46.6	0.6	12.3	479.5	14.0	50.3
	712.7	7.4	12.6	2.05	107.2	46.1	0.6	11.6	482.5	13.8	48.9
	709.8	7.6	11.9	2.18	104.6	47.0	0.6	13.1	476.4	14.2	51.7
Статистическая оценка гидрохимических показателей торфяной залежи в целом											
$\bar{x}$	730.7	7.6	9.7	1.6	95.8	48.7	0.8	20.4	505.6	12.3	45.7
$S \bar{x}$	53.5	0.03	0.8	0.1	5.4	5.2	0.2	2.3	38.4	0.5	6.7
min	273.5	7.2	2.9	1.01	35.6	12.8	0.2	6	187.9	8	4.9
max	1121.5	7.9	16.3	2.2	127.0	90.4	4.6	44.5	782.0	18.4	114.4
Cv	36	2	38	20	28	52	107	55	37	22	72

Примечание. $\bar{x}$ – среднее, $S \bar{x}$ – ошибка среднего, min – минимум, max – максимум, Cv – коэффициент вариации, %, прочерк – не определялось.

Таблица 3. Оценка межгрупповой дисперсии кластеров поверхностных болотных вод методом дискриминантного анализа

Кластер	Квадраты расстояний Махаланобиса, p -уровень значимости			Матрица классификации			
	I	II	III	% попадания	I	II	III
I	—	216.5	651.3	100	7	0	0
II	<0.001	—	125.2	100	0	15	0
III	<0.001	<0.001	—	100	0	0	9
				итоги классификации:			
				100	7	15	9

Примечание. Квадраты расстояний Махаланобиса — над чертой, p -уровни значимости различий — под чертой.

ленных зернисто-ореховатых агрегатов. Выявленные признаки пирогенной трансформации лесной торфяной почвы согласуются с итогами лабораторных опытов: торф при термической деструкции дает большую усадку, превращается в мелкие порошки, а в интервале температур 150–600°C проходит стадию размягчения, образуя вязкую массу (Раковский и др., 1959). Показано, что свойство пластичности пироторфа в природных условиях сопряжено с повышенной концентрацией битумов — продуктов спирто-бензольной экстракции (Efremova, Efremov, 1996). Увеличение плотности сложения и резкое уменьшение порозности осушенных торфяных, а также лесных почв после пожара отмечается другими авторами (Зайдельман и др., 2003; Giovannini *et al.*, 1986). Торфяной субстрат, не пройденный пожаром — рыхлый, губчатого сложения, низкой плотности 0.024–0.068 г/см³ (среднее 0.049 г/см³) складывается в основном светло-бурыми, слабо мацерированными остатками мхов с небольшим включением древесных фрагментов и раковин пресноводных моллюсков.

По состоянию сухостоя и валежа методом древовидной кластеризации (на основании определенной меры сходства или расстояния между объектами) организовались два кластера, которые определили наиболее возможно значимое объединение площадей выгоревшего ельника (рис. 2а). Сгруппированные участки 1, 2, 5, 8 (в составе пробных площадей П1, П3 и П5), отличаются суммарным количеством погибших деревьев 38.3 шт/100 м² и примерно равным соотношением сухостоя и упавших стволов без ярко выраженных признаков обгорания, что, вероятнее всего, соответствует почвенно-торфяному пожару средней силы. Кластер, группирующий участки 3, 4, 6, 7 (пр. пл П2, П4) характеризуется сокращением количества сухостоя в 3 раза и увеличением на 40% поваленных стволов. При этом валежник практически полностью обуглен, что указывает на устойчивый сильный пожар.

Формализованная классификация болотных вод по химическому составу. В качестве предварительного (разведочного) этапа исследования структуры данных использовали метод древовидной кластеризации. Группировку вод выполнили по совокупности показателей — содержанию главных ионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-), а также аммония и водорастворимого органического углерода. На дендрограмме четко обособились три кластера (рис. 2б). Кластер I объединяет пробы вод на участках, не пройденных пожаром. Кластер II и III группируют воды в пределах зоны воздействия пожара различной интенсивности — среднего и сильного соответственно. Как видим, итоги гидрохимической классификации фактически соответствуют объединению постпирогенных участков леса (пробных площадей) по интенсивности огневого воздействия на древостои.

Объективность выделения кластеров (точность классификации) подтвердили с помощью методов дискриминантного анализа. Согласно оценке квадратов расстояния Махаланобиса, сгруппированные кластеры с высоким уровнем значимости различаются между собой: пробы вод характеризуются 100% попаданием в соответствующий кластер (табл. 3). Наиболее удалены друг от друга воды исходного типа водно-минерального питания и торфяного массива, пройденного сильным пожаром. Персональный вклад ингредиентов в дискриминацию (разделение) кластеров оценивали статистиками лямбда Уилкса и F -значение. Согласно табл. 4, наибольшими дискриминантными возможностями вод обладает ион гидрокарбоната, за ним следуют магний, сульфат-ион, хлор. Наименьшей способностью разделять кластеры вод обладает катион натрия. Содержание углерода является незначимым показателем, а кальций, калий и аммоний исключаются из модели.

Минимизировать число переменных, т.е. определить количество скрытых (латентных) независимых факторов, позволяет канонический анализ пу-

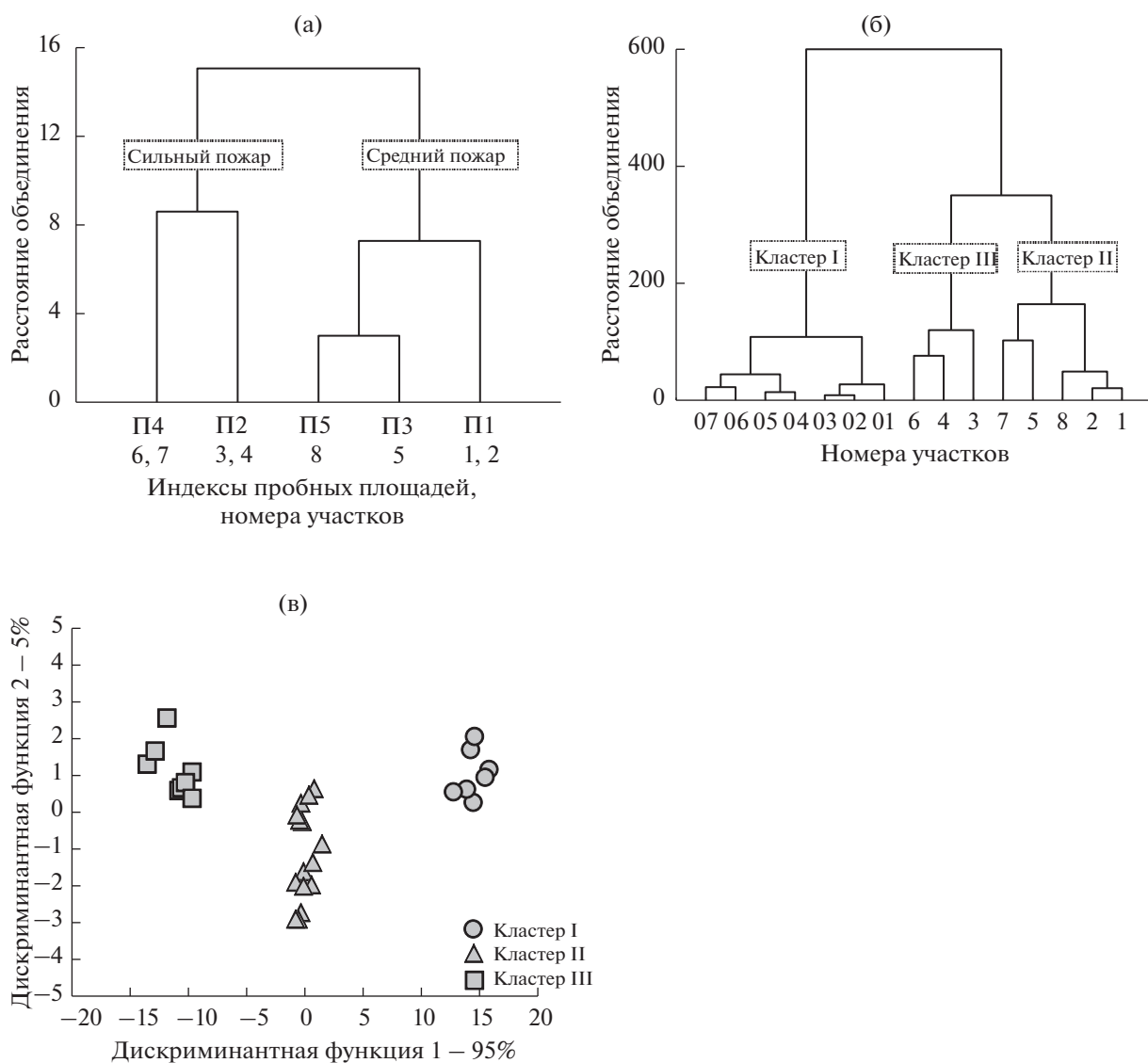


Рис. 2. Древоидная диаграмма объединения участков торфяного массива долины р. Тунгужуль по состоянию сухостоя и валежа (а), по химическому составу болотных вод (б), канонические значения дискриминантных функций кластеров болотных вод (в). Кластер I – болотные воды исходного типа водно-минерального питания, кластеры II и III – болотные воды массивов, пройденных средним и сильным пожаром соответственно.

тем вычисления дискриминантных функций (корней). Количество оцениваемых функций рассчитывается как число выделенных кластеров минус единица. Каждая функция характеризуется определенной способностью различать кластеры. Согласно табл. 5, первый корень обладает высокой дискриминирующей мощностью. Стандартизованные коэффициенты позволяют определить для каждой переменной наибольший совокупный вклад, или “вес”, в значение дискриминантной функции (корня). Согласно критерию Кайзера, к рассмотрению числа переменных принимались те стандартизованные коэффициенты, абсолютные значения которых больше 1: нагрузки канонических факторов можно интерпретировать так

же, как в факторном анализе (Ким и др., 1989). Как следует из табл. 6, дискриминантная функция (корень) 1, ответственная за 95% объясненной дисперсии, взвешивается в основном содержанием ионов HCO_3^- , Mg^{2+} и SO_4^{2-} . Вклад в канонический корень 2, на долю которого приходится 5% дискриминирующих возможностей, вносят катионы натрия. Персональный вклад канонической переменной в значение каждой дискриминантной функции оценивается структурными коэффициентами, которые показывают, насколько тесно связаны отдельная переменная и конкретная дискриминантная функция. Когда абсолютная величина такого коэффициента велика, вся ин-

Таблица 4. Вклад показателей химического состава в дискриминацию поверхностных болотных вод

Переменные модели	Лямбда Уилкса	Частная лямбда	F-критерий	p-уровень
Оценка качества модели: лямбда Уилкса – 0.0046, F-критерий – 65.87, p-уровень < 0.001				
HCO_3^-	0.105	0.037	295.9	<0.001
Mg^{2+}	0.008	0.501	11.4	<0.001
SO_4^{2-}	0.007	0.571	8.6	0.002
Na^+	0.005	0.749	3.9	0.036
Cl^-	0.006	0.629	6.8	0.005
C	0.005	0.851	2.0	0.157

Таблица 5. Собственные значения дискриминантных функций (корней) и их статистическая значимость

Дискриминантная функция (корень)	Собственное значение	Каноническая корреляция, R	λ -статистика Уилкса	Статистика хи-квадрат, χ^2	p-уровень
Корень 1	88.8	0.99	0.005	139.8	<0.001
Корень 2	3.2	0.78	0.407	25.1	<0.001

формация о дискриминантной функции заключена в этой переменной, если же коэффициент близок к нулю – их зависимость мала (Ким и др., 1989). Как следует из табл. 6, наиболее тесно с функцией 1 связаны анионы гидрокарбонатов, с корнем 2 – катионы натрия.

Диаграмма рассеяния нестандартизованных канонических коэффициентов для каждой отдельной пробы вод в координатах двух выделенных дискриминантных функций показывает три четко обособленные группы, что дополнительно подтверждает объективность организации болотных вод по химическому составу (рис. 2в).

Химический состав и систематика кластеров болотных вод. Болотные воды торфяной залежи естественного хода развития относятся по степени минерализации к семейству пресных, бедных растворенным органическим веществом гумусовой природы, оценка по (Ефремова и др., 2018) по соотношению ионов – к виду гидрокарбонатных кальциево-магниевых, подвиду II – $\text{HCO}_3^- < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} < \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$, по величине жесткости – к мягким (табл. 7).

Кластер болотных вод торфяной залежи, пройденной пожаром средней силы, характери-

Таблица 6. Коэффициенты дискриминантных функций (корней) и доля объясненной дисперсии

Переменные	Стандартизованные коэффициенты		Коэффициенты факторной структуры	
	корень 1	корень 2	корень 1	корень 2
HCO_3^-	–3.59	–0.15	–0.41	0.25
Mg^{2+}	2.58	–0.86	–0.15	0.10
SO_4^{2-}	1.21	0.32	–0.04	0.21
Na^+	0.29	1.71	–0.10	0.43
Cl^-	–0.73	–0.90	0.00	–0.36
Собственные значения корня	88.8	3.2		
Накопленная доля объясненной дисперсии	0.95	1.00		
Доля объясненной дисперсии, %	95	5		

Таблица 7. Химический состав кластеров поверхностных болотных вод эвтрофного торфяного массива долины р. Тунгужуль естественного ряда развития и участков залежи, пройденных пожаром

$\Sigma_{\text{и}}$, мг/л	рН	С, мг/л	Катионы, мг/л					Анионы, мг/л			Общая жесткость, $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, мг-экв/л
			NH_4^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	
Кластер I – пресные, мягкие болотные воды исходного типа водно-минерального питания											
$\frac{357}{25.0}$	$\frac{7.5}{0.08}$	$\frac{4.7}{0.7}$	1.8	$\frac{51.9}{5.3}$	$\frac{18.3}{2.2}$	$\frac{1.8}{0.5}$	$\frac{12.8}{2.0}$	$\frac{233.9}{13.7}$	$\frac{11.4}{1.0}$	$\frac{26.5}{6.8}$	$\frac{4.12}{0.4}$
Кластер II – пресные, жесткие болотные воды массива, пройденного пожаром средней силы											
$\frac{721}{26.7}$	$\frac{7.6}{0.04}$	$\frac{10.8}{0.8}$	$\frac{1.6}{0.1}$	$\frac{107.8}{2.2}$	$\frac{44.7}{3.9}$	$\frac{0.6}{0.1}$	$\frac{14.8}{1.3}$	$\frac{494.4}{13.5}$	$\frac{13.3}{0.8}$	$\frac{44.0}{8.1}$	$\frac{9.1}{0.4}$
Кластер III – слабосолоноватые, очень жесткие болотные воды массива, пройденного сильным пожаром											
$\frac{1037}{29.8}$	$\frac{7.6}{0.03}$	$\frac{11.63}{0.4}$	$\frac{1.5}{0.1}$	$\frac{110.0}{4.4}$	$\frac{79.0}{3.8}$	$\frac{0.3}{0.03}$	$\frac{35.7}{1.9}$	$\frac{735.5}{16.2}$	$\frac{11.2}{0.4}$	$\frac{63.5}{12.5}$	$\frac{12.1}{0.3}$

Примечание. $\Sigma_{\text{и}}$ – сумма ионов (степень минерализации), числитель – среднее, знаменатель – ошибка среднего ($\pm$).

Таблица 8. Кратность превышения и темпы прироста гидрохимических показателей эвтрофного болота, пройденного пожаром различной интенсивности относительно исходного типа водно-минерального питания

$\Sigma_{\text{и}}$	С	Катионы				Анионы		
		Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}
Пожар средней силы								
$\frac{2.02}{102}$	$\frac{2.29}{132}$	$\frac{2.08}{107.7}$	$\frac{2.45}{144.3}$	$\frac{1.16}{15.6}$	$\frac{0.32}{-66.6}$	$\frac{2.11}{111.4}$	$\frac{1.16}{16.7}$	$\frac{1.66}{66.0}$
Сильный пожар								
$\frac{2.90}{190.5}$	$\frac{2.47}{146.8}$	$\frac{2.12}{111.9}$	$\frac{4.33}{331.7}$	$\frac{2.79}{178.9}$	$\frac{0.16}{-83.3}$	$\frac{3.14}{214.4}$	$\frac{0.98}{-1.8}$	$\frac{2.40}{139.6}$

Примечание. Числитель – кратность превышения, знаменатель – темпы прироста, %.

зается значительным увеличением суммы ионов за счет более чем двукратного роста HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , а также водорастворимого углерода (табл. 8). Несколько в меньшей кратности (1.2–1.7) возрастает содержание ионов Cl^- , Na^+ , SO_4^{2-} . Тем не менее, воды сохраняют исходную классификационную принадлежность по основным таксономическим уровням, но переходят в категорию жестких. За 20-летний послепожарный период в водах снизилось лишь количество калия, который, без сомнения, благодаря высокой растворимости, легко вымывался из толщи торфяника, а также активно поглощался корнями древесной и травянистой растительности.

Под влиянием сильного пожара в болотных водах резко возрастают темпы прироста ионов HCO_3^- и Mg^{2+} (214–332%), немногим меньше Na^+ и SO_4^{2-} (179–140%). Воды переходят в другую категорию качества и классифицируются как слабосо-

лоноватые, очень жесткие, хотя по-прежнему обеднены растворенным органическим веществом, сохраняют гидрокарбонатный кальциево-магниевый состав с соотношением ионов, присущим подвиду II. Воздействие сильного пожара относительно пожара средней силы на поведение катионов кальция, калия, аммония, а также водорастворимого углерода сказывается мало.

Спустя 20 лет после пожара сгруппированные кластеры болотных вод эвтрофного торфяного массива долины р. Тунгужуль вне зависимости от интенсивности огня сохраняют принадлежность к классу нейтральных и слабощелочных. Аналогичная ситуация отмечается в погребенных пирогенно-преобразованных слоях торфяной залежи, в которых кислотно-основные условия среды не отличаются от современных почв (Ефремова, Ефремов, 1994; Глебов, Александрова, 1973). Причина, на наш взгляд, кроется в существенном обогащении пирогенных горизонтов торфа гумусовыми кислотами главным образом первой фракции, которая

по сравнению с другими фракциями торфяных гуминовых кислот содержит в составе молекулы большее количество карбоксильных групп (Ефремова, Ефремов, 2006). Преимущественное формирование данной фракции, вероятнее всего, обусловлено реакциями омыления, которые преобладают в процессе мокрого обугливания торфа и сопровождаются гидролитическим расщеплением сложных эфиров с образованием гидроксильных и карбоксильных групп (Раковский и др., 1959).

Итак, методами многомерного анализа объективно доказано, что наибольшей дискриминирующей мощностью (95%) в определении болотных вод обладают ионы магния и гидрокарбонатов. Такое явление объяснимо. Установлено, что торфяные пожары сопровождаются химическим недожогом и выбросом в атмосферу большого количества дыма, двуокиси серы, углекислого газа и других продуктов горения (Добрых, Захарычева, 2009). При растворении CO_2 в воде образуется, как известно, угольная кислота (H_2CO_3), которая при величине pH 6–10 диссоциирует на гидрокарбонаты (HCO_3^-) или карбонаты (CO_3^{2-}) при уровне pH 10–12. Слабощелочная реакция болотных вод обсуждаемой торфяной залежи (pH 7.6) способствует активному образованию гидрокарбонатов. В воде, насыщенной углекислым газом, сильно увеличивается растворимость гидрокарбонатов кальция и особенно магния (Шварцев, 1999), которые в составе зольных элементов, наряду с калием, фосфором, натрием и другими элементами, высвобождаются из субстрата огневого воздействия (Мелехов, Душа-Гудым, 1979; Абаимов и др., 2001; Tuittila *et al.*, 2007). Магний активно поступает в водную среду, отделяясь от хлорофилла под действием термической деструкции растительных остатков и угольной кислоты. Меньший вес ионов Na^+ и SO_4^{2-} в дискриминации болотных вод массива Тунгужуль обусловлен, скорее всего, их активным выщелачиванием с площади пожара вследствие высокой растворимости.

ВЫВОДЫ

1. Впервые на примере ключевого объекта заторфованных речных долин Кузнецкого Алатау, занятых ельниками, объективно доказана трансформация химического состава поверхностных вод эвтрофных болот вследствие лесо-торфяных пожаров.

2. Почвенно-грунтовые воды болотного ельника по содержанию главных ионов объективно сгруппировались в три кластера: исходного типа водно-минерального питания (кластер I), после пожара средней силы (кластер II) и пройденные сильным пожаром (кластер III). Наибольшей дискриминирующей мощностью (95%) в опреде-

лении болотных вод обладают ионы магния и гидрокарбонаты.

3. Воды исходного типа водно-минерального питания относятся к классу нейтральных и слабощелочных, семейству пресных гидрокарбонатных кальциево-магниевых, бедных растворенным органическим веществом, по величине жесткости — к мягким. Под воздействием пожара средней силы болотные воды, сохраняя статус пресных, переходят в категорию жестких. Сильный пожар способствует значительному увеличению общей минерализации ($\Sigma_{\text{и}} > 1000$ мг/л) и воды трансформируются в слабосоленоватые, очень жесткие. Независимо от силы пожара воды болотного ельника эвтрофного ряда развития сохраняют слабощелочную реакцию среды и остаются обедненными водорастворимым органическим веществом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абаимов А.П., Прокушкин С.Г., Зырянова О.А., Каназава Ю., Такахаши К. Экологическая и лесообразующая роль пожаров в криолитозоне Сибири // Лесоведение. 2001. № 5. С. 50–59.
- Алекин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 444 с.
- Алекин О.А., Семенов А.Д., Скворцов Б.А. Руководство по химическому анализу вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 269 с.
- Банников М.В., Поздняков А.И., Шевченко Е.М., Умарова А.Б., Бутылкина М.А. Изменение свойств пирогенно-торфяных почв под влиянием факторов почвообразования // Вест. Моск. Унив. Сер. 17. Почвоведение. 2004. № 1. С. 37–43.
- Волокитина А.В. Пожарное созревание заболоченных лесов юга Западной Сибири / Лесные пожары и их последствия. Красноярск: ИЛиД, 1985. С. 64–73.
- Глебов Ф.З., Александрова С.Р. Фитоценотическая характеристика, гидротермический режим и почвенная микрофлора некоторых типов болотных Томского стационара в связи с микрорельефом / Комплексная оценка болот и заболоченных лесов в связи с их мелиорацией. Новосибирск: Наука, 1973. С. 23–44.
- Глухова Т.В., Сирин А.А. Потери почвенного углерода при пожаре на осушенном лесном верховом болоте // Почвоведение. 2018. № 5. С. 580–588.
- Добрых В.А., Захарычева Т.А. Дым лесных пожаров и здоровье. Хабаровск: Изд-во ГОУ ВПО Дальневост. Государ. Мед. Универ. 2009. 201 с.
- Ефремова Т.Т., Ефремов С.П. Торфяные пожары как экологический фактор развития лесоболотных экосистем // Экология, 1994. № 5. С. 27–34.
- Ефремова Т.Т., Ефремов С.П. Пирогенная трансформация органического вещества почв лесных болот // Почвоведение. 2006. № 12. С. 1441–1450.
- Ефремова Т.Т., Ефремов С.П., Аврова А.Ф. Формализованная группировка притоков Оби таежной зоны по химическому составу вод // Географический вестник = Geographical bulletin. 2018. № 2. С. 88–103.

- Зайдельман Ф.Р., Морозова Д.И., Шваров А.П. Изменение свойств пирогенных образований и растительности на сгоревших осушенных почвах полей // Почвоведение. 2003. № 11. С. 1300–1309.
- Ким Дж.-О., Мьюллер Ч.У., Клекка У.Р., Олдендерфер М.С., Блэшифилд Р.К. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ. М.: Финансы и статистика, 1989. 215 с.
- Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- Копотева Т.А., Купцова В.А. Влияние пожаров на функционирование фитоценозов торфяных болот Среднеамурской низменности // Экология. 2016. № 1. С. 14–21.
- Курбатский Н.П. Техника и тактика тушения лесных пожаров. М.: Гослесбумиздат, 1962. 154 с.
- Мелехов И.С., Душа-Гудым С.И. Лесная пирология. М., 1979. 80 с.
- Мировая реферативная база почвенных ресурсов 2014. Международная система почвенной классификации для диагностики почв и создания легенд почвенных карт. Исправленная и дополненная версия 2015. ФАО и МГУ, 2017. 203 с.
- Мирошников А.Е., Стрижма Т.П., Смолянинова Л.Г., Анцифорова О.В., Кочнева Н.А., Кузнецов В.В., Максимова С.В. Оценка территориального экологического равновесия Центральной Сибири. Красноярск, КНИИГиМС. 2003. 192 с.
- Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрель, 1999. 768 с.
- Пьявченко Н.И. Биогеоэкологические закономерности генезиса болот и динамика растительного покрова / Генезис и динамика болот. М.: МГУ, 1978. С. 13–18.
- Раковский В.Е., Каганович Ф.Л., Новичкова Е.А. Химия пирогенных процессов. Минск: АН БССР, 1959. 208 с.
- Санников С.Н. Лесные пожары как фактор преобразования структуры, возобновления и эволюции биогеоценозов // Экология. 1981. № 6. С. 23–33.
- Скворцова Е.Б., Рожков В.А., Щепотьев В.Н., Дмитриенко В.Н., Тюгай З.Н., Хохлов С.Ф. Варьирование микроморфологических показателей строения пор в суглинистых почвах южной тайги и лесостепи европейской территории России // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1061–1073.
- Фурьев В.В. Влияние уровней грунтовых вод на пожарное созревание заболоченных и болотных лесов Кеть-Чулымского междуречья / Вопросы лесной пирологии. Красноярск, 1970. С. 186–220.
- Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М.: Недра. 1999. 366 с.
- Benscoter B.W., Greenacre D., Turetsky M.R. Wildfire as a key determinant of peatland microtopography // Canad. J. Forest Res. 2015. V. 45. № 8. P. 1132–1136.
- Giovannini G., Lucchesi S., Giacheffi M. Soil aggregation and cementation as affected by heating / Trans. 13. Congr. Int. Soc. Soil. Sci. Hamburg, 13–20 Aug., 1986. V. 2. P. 58–59.
- Efremova T.T., Efremov S.P. Ecological Effects of Peat Fire on Forested Bog Ecosystems / Fire in Ecosystems of Boreal Eurasia. Dordrecht / Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 1996. Printed in the Netherlands. P. 350–357.
- Tuittila E.-S., Välijärvi M., Laine J., Korhola A. Quantifying patterns and controls of mire vegetation succession in a southern boreal bog using a combination of partial ordinations // J. Veget. Sci. 2007. V. 18. P. 891–902.
- Turetsky Merritt R., Benscoter Brian, Page Susan, Rein Guillermo, R. van der Werf Guido and Watts Adam. Global vulnerability of peatlands to fire and carbon loss // Nature Geoscience. 2015. V. 8. P. 11–14.
- Wieder R.K., Scott K.D., Kamminga K.K., Vile M.A., Vitt D.H., Bone T., Xu B., Benscoter B.W., Bhatti J.S. Post-fire carbon balance in boreal bogs of Alberta, Canada // Glob. Change Biol. 2009. V. 15. P. 63–81.

Experience in Assessing the Impact of Forest-Peat Fires on the Hydrochemical Properties of the Swamps

T. T. Efremova^{1,*}, A. V. Pimenov¹, S. P. Efremov¹, A. F. Avrova¹, and D. Yu. Efimov¹

¹Sukachev Institute of Forest SB RAS, Federal Research Center "Krasnoyarsk Science Center SB RAS", Akademgorodok 50/28, Krasnoyarsk, 660036 Russia

*e-mail: efr2@ksc.krasn.ru

For the first time, using the example of a key object of the peat river valleys of the Kuznetsk Alatau occupied by spruce forests, it is shown, that due to forest-peat fires, swamp waters are clearly differentiated by the content of main ions. Swamp waters objectively form three groups: 1 – waters of the original type of mineral nutrition (fresh, soft), 2 – waters of peatland, covered by a medium fire (fresh, hard), 3 – waters of peatland, covered by a high fire (slightly saline, very hard). Magnesium ions and bicarbonates have the highest discriminating power (95%) in the determination of swamp waters. The swamp waters of the post-pyrogenic peatland do not lose similar to waters of the original type the ratio of the main ions and retain the hydro-carbonate calcium-magnesium composition.