

Установление гидрохимического фона верховых болот различных регионов России для обоснования нормативов допустимого воздействия на болота*

Т. М. Потапова¹, М. Л. Марков², О. В. Задонская²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

² Государственный гидрологический институт,
Российская Федерация, 199053, Санкт-Петербург, 2-я линия В. О., 23

Для цитирования: Потапова Т. М., Марков М. Л., Задонская О. В. (2020). Установление гидрохимического фона верховых болот различных регионов России для обоснования нормативов допустимого воздействия на болота. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 65 (3), 455–467. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.303>

Цель работы — установление основных закономерностей формирования гидрохимического фона для разработки нормативов допустимого воздействия на верховые болота. Методы исследования — физико-химический анализ, водно-балансовые расчеты, статистическая обработка аналитических данных. Гидрохимический фон верховых болот установлен по материалам обобщения гидрохимических данных трех типовых и наиболее изученных болот Ленинградской (болото Ламмин-Суо), Архангельской (Иласское болото) и Томской (Васюганское болото) областей. Проведена оценка пространственной и сезонной изменчивости основных компонентов химического состава (главные ионы, биогенные элементы, органическое вещество, тяжелые металлы) болотных вод. В виду отсутствия статистически значимых различий между внутригодовыми гидрохимическими показателями олиготрофных микроландшафтов гидрохимический фон установлен по объединенным выборкам среднегодовалных значений концентраций химических веществ всех исследованных болот. Разработаны ориентировочно допустимые концентрации химических веществ в сбрасываемых на болото сточных водах с целью сохранения олиготрофного уровня трофности верховых болот. На основе водно-балансовых расчетов выполнено упрощенное определение допустимой массы привноса химических веществ сбрасываемых сточных вод. Выявлены существенные различия в величинах нормативов допустимого воздействия (НДВ) с применением действующих предельно допустимых концентраций (ПДК) и разработанных авторами ориентировочно допустимых концентраций (ОДК). НДВ, рассчитанные по ОДК для главных ионов, общей минерализации, нитратам, в 5 раз ниже, а для органического вещества, аммония и общего железа в 5–50 раз больше рассчитанных по ПДК. Таким образом, применение предложенных авторами более гибких критериев по концентрациям сбрасываемых загрязняющих веществ, позволяет как минимизировать степень антропогенных нарушений болот, так и существенно снизить затраты на очистку сточ-

* Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 годах».

ных вод от ряда химических веществ, характерных для естественного фона верховых болот.

Ключевые слова: верховое болото, химический состав, фоновые гидрохимические показатели.

1. Введение

В некоторых районах России болота представляют основной элемент гидрографической сети, и поэтому они вовлечены в водохозяйственную деятельность. Вместе с тем в России до сих пор не разработаны нормативы использования болот, как водных объектов. Из-за отсутствия правовой основы о допустимом воздействии на болота в ряде регионов России либо полностью запрещено использование болот, либо они вовлечены в водохозяйственную деятельность, но при этом возникает нарушение устойчивости водно-болотных экосистем. Поэтому разработка нормативов допустимого воздействия на болота в России крайне необходима. Одной из ключевых задач при этом является установление предельных допустимых концентраций загрязнений, которые могут быть привнесены в болота при их водохозяйственном использовании. В действующих нормативах определение допустимости воздействия на болота опирается на фоновые (природные) показатели качества воды. Для болот они зависят от типа водного питания, гидрогеологических и геологических условий, места расположения относительно рельефа и связи с гидрографической сетью.

К настоящему времени в отечественной и зарубежной литературе накоплен значительный материал об экологии и гидрохимии болот (Ларгин и Тюремнов, 1966; Lasaga, 1995; Jakob, 1997; Инишева и Инишев, 2001; Eckstein et al., 2015). При этом наиболее обширные современные гидрохимические исследования олиготрофных болот проводились в Западной Сибири на территории Васюганской болотной системы силами сотрудников Томского педагогического университета (Инишева и Инишев, 2001) и Томского политехнического университета (Савичев, 2015). Большой вклад в изучение гидрохимии олиготрофных болот Северо-Запада и севера Западной Сибири внесли труды ученых Государственного гидрологического института и Санкт-Петербургского государственного университета (Потапова, 1991; Калужный, 1999). Материалы перечисленных исследований были использованы в настоящей статье для выявления характерных закономерностей формирования гидрохимического фона верховых болот.

2. Методика исследований

Установление нормативов допустимого воздействия на верховые болота проведено на основе определения гидрохимических фоновых показателей для верховых болот различных регионов России. Расчет фоновых содержаний (C_{ϕ}) основных компонентов химического состава болотных вод проведен на основе статистической обработки гидрохимических данных в соответствии с (Перечень..., 2017) по формуле:

$$C_{\phi} = C_a + \frac{t_{\alpha, \sigma}}{\sqrt{M}}, \quad (1)$$

где $C_{\text{ф}}$ — фоновое содержание, C_a — среднее арифметическое, σ — среднее квадратичное отклонение, M — объем выборки (от 30 до 50 членов (с возможностью расширения временного интервала за счет смежных интервалов, удовлетворяющих условию статистической однородности) с наибольшими за год содержаниями исследуемого вещества); t_{α} — коэффициент Стьюдента при уровне значимости $\alpha = 5\%$.

Установление фоновых гидрохимических характеристик верховых болот выполнено на основе обобщения данных различных регионов России: для Северо-Запада (Иласский болотный массив Архангельской области и болотный массив Ламмин-Суо Ленинградской области), для Западной Сибири (Васюганская болотная система Томской области).

Установление гидрохимического фона верховых болот было основано на предварительной оценке пространственной и сезонной изменчивости различных компонентов химического состава (главных ионов, рН, органического вещества, биогенных элементов и микроэлементов) для наиболее изученных верховых болот. Пространственная изменчивость химического состава болотных вод оценена на основе сопоставления статистически обоснованных гидрохимических данных различных видов болотных микроландшафтов, доминирующих на верховых болотах различных регионов России. Различия гидрохимических показателей олиготрофных фитоценозов верховых болот, по нашему мнению, объясняются конкурентным взаимодействием гидрологических и фитоценологических факторов (Потапова, 1991). При этом на видовой состав растительности болот большое влияние оказывает интенсивность водообмена, определяющаяся величиной модуля водного стока (проточностью). В соответствии с данными основоположника отечественной гидрологии болот К. Е. Иванова проточность сосново-кустарничкового биоценоза колеблется в интервале 0.5–2 л/сек. на км, а в грядово-мочажинном комплексе (ГМК) — 1.5–6 л/сек. на км (Иванов, 1975). При этом оптимальные значения проточности (удельный расход воды в деятельном горизонте на единицу длины контура стекания Q) для максимального выщелачивания химических веществ из торфяной залежи составляет $Q = 1–5$ л/сек. на км, тогда как при $Q < 1$ л/сек. на км поступление минеральных веществ из торфов в воду минимально (Потапова, 1991). Необходимо иметь в виду, что в значительной степени на формирование химического состава болотных вод оказывают и процессы жизнедеятельности болотной фитофлоры. Выявленная тенденция увеличения минерализации в грядово-мочажинном комплексе в исследованных болотах может быть связана с наложением фитоценологического фактора, а именно снижением поглотительной способности более бедной по видовому составу растительности ГМК в отношении минеральных солей, что в конечном счете и приводит к некоторому увеличению минерализации воды (не выходящему за пределы статистической погрешности) в ГМК по сравнению с сосново-сфагново-кустарничковым микроландшафтом. Отсутствие статистически значимых различий гидрохимических показателей между олиготрофными фитоценозами обуславливает возможность установления гидрохимического фона верховых болот по среднесезонным значениям содержаний химических веществ по объединенным выборкам для всех олиготрофных микроландшафтов, доминирующих на верховых болотах: грядово-мочажинные и грядово-озерковые комплексы, сосново-сфагново-кустарничковые и сфагново-осоково-пушицевые и другие фитоценозы.

Оценка временной (сезонной) изменчивости химического состава вод верховых болот проведена на основе наиболее репрезентативных данных сезонных наблюдений за многолетний период (1993–2015 гг.). Согласно действующим на сети Росгидромета нормативам, при расчете фоновых характеристик приоритет отдается «средним многолетним содержаниям вещества с учетом наиболее неблагоприятных гидрологических условий», к которым относятся снижение уровней болотных вод в меженные периоды (Перечень..., 2017). В связи с этим было проведено обобщение гидрохимических данных Иласского болота в основные гидрологические фазы водности для наиболее репрезентативных выборок с числом членов (N) от 30 до 50 за каждый сезон (табл. 1).

Таблица 1. Сезонная изменчивость гидрохимических показателей в глядово-мочажинном комплексе Иласского болотного массива за период 1993–2015 гг.

| Сезон | весеннее половодье $N = 50$ | | летняя межень $N = 45$ | | осенний паводок $N = 40$ | | зимняя межень $N = 30$ | |
|---|--------------------------------|-------|---------------------------|-------|-----------------------------|-------|---------------------------|-------|
| | C_{ϕ} | C_v | C_{ϕ} | C_v | C_{ϕ} | C_v | C_{ϕ} | C_v |
| общая минерализация, мг/дм ³ | 27 | 0.48 | 29 | 0.45 | 25 | 0.48 | 29 | 0.65 |
| ХПК, мгО/дм ³ | 193 | 0.39 | 240 | 0.22 | 203 | 0.33 | 172 | 0.35 |
| нитрат-ион, мг/дм ³ | 0.53 | 1.27 | 0.39 | 0.90 | 0.44 | 1.13 | 0.57 | 0.60 |
| железо общее, мг/дм ³ | 2.1 | 0.57 | 3.2 | 0.42 | 3.3 | 0.51 | 1.80 | 0.55 |
| Формула воды | Ca-SO ₄ | | Ca-SO ₄ | | Ca-SO ₄ | | Na-SO ₄ | |

Примечание: N — число членов в выборке; C_{ϕ} — сезонная фоновая концентрация компонента за многолетний период; C_v — коэффициент вариации среднего.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о малой сезонной изменчивости содержаний главных ионов и общей минерализации в водах верховых болот. Значения общей минерализации варьируют на уровне 25–29 мг/дм³ с незначительным увеличением (на 10–20%) в осенний период; для ионного состава характерно перераспределение катионного состава от кальциевого к натриевым в зимнюю межень. Для биогенных элементов — нитратного азота и минерального фосфора — зарегистрировано некоторое снижение (на 25%) концентраций в период летней межени, оказывающееся за пределами статистической значимости их сезонных различий в виду высокой вариабельности ($C_v > 1$) их значений. Несмотря на то, что для большинства компонентов химического состава болотных вод (главных ионов, минерализации, органического вещества, биогенных элементов) не выявлено существенных различий в разные гидрологические фазы водности (периоды межени и половодья), авторами в своих предшествующих работах отмечалась в отдельные годы наблюдений характерная особенность увеличения общей минерализации, цветности и рН в позднеосенний период — в начале ледостава. В условиях прекращения вегетационной активности в предзимний период увеличение минерализации происходит при изменении агрегатного состояния вещества, сопровождающегося переходом воды из жидкой фазы в твердую фазу льда (Физическая геохимия, 1968). В соответствии с законами физической химии (правилом

фаз Гиббса) этот процесс приводит к перераспределению концентраций веществ, особенно активно протекающих на границе раздела фаз: торф — вода, донные отложения — вода, что, в конечном счете, и приводит к увеличению концентраций химических веществ в болотной воде как в начале замерзания воды (появления твердой фазы льда в период предзимья) или в конце зимней межени и в начале снеготаяния. Необходимо отметить, что и в эти кратковременные периоды общая минерализация не достигает значений выше 50 мг/л, т. е. сохраняется уровень вод очень малой минерализации.

Ввиду трудности установления этих кратковременных концентрационных максимумов, а также отсутствия статистически значимых различий сезонной изменчивости основных гидрохимических показателей в настоящей работе установление гидрохимического фона верховых болот выполнено по средним многолетним данным по объединенным выборкам всех наблюдаемых значений приоритетных показателей химического состава болотных вод. Фоновые значения основных химических показателей (рН, общей минерализации и составляющих ее главных ионов, растворенных газов, ряда микроэлементов и органических загрязняющих веществ) верховых болот различных регионов нашей страны, рассчитанные для наиболее репрезентативных выборок (от 20 до 45 членов), представлены в табл. 2 (Савичев, 2015).

Таблица 2. Фоновые содержания основных химических показателей в водах верховых болот различных регионов России

| Название объектов | болото Западной Сибири — Васюганское | | болото Архангельской обл. — Иласское | | болото Ленинградской обл. — Ламмин-Суо | |
|--------------------------------|--------------------------------------|----------------|--------------------------------------|----------------|--|----------------|
| | 2002–2015 гг. N* = 46 | | 1993–2015 гг. N = 120 | | 2009–2015 гг. N = 80 | |
| Показатель, мг/дм ³ | C _ф | C _в | C _ф | C _в | C _ф | C _в |
| рН | 4.5 | 0.16 | 4.3 | 0.09 | 4.25 | 0.12 |
| Ca-ион | 6.7 | 0.54 | 4.1 | 0.79 | 2.5 | 0.39 |
| Mg-ион | 2.4 | 1.0 | 1.5 | 0.82 | 0.8 | 0.44 |
| Na+K-ионы | 2.5 | 1.0 | 5.2 | 0.50 | 1.2 | 0.61 |
| HCO ₃ -ион | 3.3 | 1.0 | 0.9 | 0.90 | < 1 | |
| SO ₄ -ион | 4.5 | 1.6 | 12 | 0.76 | 3.6 | 0.31 |
| Cl-ион | 2.4 | 0.55 | 4.3 | 0.49 | 4.0 | 0.85 |
| сумма ионов | 28 | 0.59 | 27 | 0.48 | 15 | 0.60 |
| XПК, мгО/дм ³ | 201 | 0.96 | 212 | 0.32 | 80 | 0.31 |
| нитрат-ион | 0.63 | 1.1 | 0.44 | 1.1 | 0.05 | 1.2 |
| нитрит-ион | 0.023 | 1.8 | 0.033 | 1.25 | 0.017 | 1.3 |
| аммоний-ион | 4.6 | 0.77 | 0.38 | 1.8 | 1.4 | 0.63 |
| фосфат-ион | 0.086 | 1.1 | 0.03 | 0.79 | 0.03 | 1.4 |

Примечание: N — число членов в выборке; C_ф — среднее многолетнее содержание; C_в — коэффициент вариации среднего.

3. Результаты исследования и их обсуждение

Из анализа полученных фоновых характеристик можно сделать важный вывод о том, что в водах олиготрофных болот, территориально удаленных друг от друга, изменение содержания главных ионов находится в близких пределах, средние величины общей минерализации вод исследованных болот варьируют в узком интервале очень малой минерализации, не превышающей 50 мг/дм^3 . Вариабельность содержаний главных ионов очень высокая ($C_v = 0.30\text{--}1.6$). Коэффициент вариации общей минерализации изменяется в относительно узком интервале ($C_v = 0.3\text{--}0.6$), что определяет ее наибольшую репрезентативность. В соответствии с классификацией О. А. Алекина (1970) эти воды относятся к сульфатному (реже хлоридному) классу, группе кальция IV типа. Необходимо отметить, что эти данные согласуются с основными гидрохимическими характеристиками верховых болот, установленными в работах предшествующих исследователей и полностью подтверждают их атмосферный характер питания (Ларгин и Тюремнов, 1966). Общими гидрохимическими признаками исследованных болот является кислая (реже слабокислая) реакция среды, обусловленная высоким содержанием органических гуминовых и фульвокислот при средних значениях химического потребления кислорода (ХПК) до 232 мгО/дм^3 с некоторым снижением (до 80 мгО/дм^3) в водах верховых болот Ленинградской области. Кислая реакция среды ($\text{pH} < 5$) определяет тип карбонатного равновесия вод олиготрофных болот, которое полностью сдвинуто в сторону высокого молярного содержания углекислого газа на фоне следовых содержаний (фактического отсутствия) гидрокарбонатных ионов, что и приводит к аномально высоким (по сравнению с речными водами) содержаниям растворенного углекислого газа ($> 100 \text{ мг/дм}^3$). Эти особенности газового состава болотных вод определяют их свойства общекислотной и выщелачивающей агрессивности, характерной для вод олиготрофных болот. Низкий уровень содержания растворенного кислорода (от 20 до 30 % насыщения) обуславливает создание восстановительной обстановки в исследуемых болотных водах, которая определяет особенности их биогенного состава. Как видно из табл. 2, воды всех исследованных болотных массивов наиболее обогащены аммонийным азотом, кремнием, железом, фоновые содержания которых достигают значений единиц миллиграмм в литре, тогда как в атмосферных и речных водах они варьируют на уровне сотых и десятых долей миллиграмм в литре. И наоборот, содержания окисленных форм азота крайне низкие: для нитритного и нитратного азотов для болот разных регионов фоновые содержания варьируют на уровне от сотых до десятых долей миллиграмм в литре.

Анализ обобщенных данных микроэлементного состава исследованных болот позволяет выявить следующие закономерности в распределении содержаний микроэлементов в исследуемых болотных водах. Последовательность изменения содержаний химических элементов в болотных водах можно представить в виде ряда: $\text{Si} > \text{Fe} > \text{Al} > \text{Mn} > \text{Zn} \gg \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Co} > \text{As} > \text{Cd}$. При этом содержания алюминия, общего железа и кремния максимальны и варьируют на уровне сотен и тысяч микрограмм в литре, марганца и цинка — до десятков микрограмм, меди, свинца, никеля — единиц микрограмм, кобальта, мышьяка и кадмия — до десятых долей микрограмм в литре. Следует отметить, что, несмотря на значительные (в 3–5 раз) превышения фоновых содержаний ряда тяжелых металлов (меди, цин-

ка) предельно допустимых концентраций вод рыбохозяйственного назначения (ПДКр/х) (Перечень..., 1995), их содержания сопоставимы с фоновыми содержаниями этих элементов в речных водах (Никаноров, 2011). Повышенные содержания металлов (железа, алюминия, цинка), по нашему мнению, обусловлены процессами выщелачивания этих элементов из торфяного субстрата кислыми болотными водами. Отметим, что данные микроэлементного состава болотных вод носят предварительный и ориентировочный характер и, безусловно, нуждаются в подтверждении повторными определениями с большим количеством проб, отобранных в разные гидрологические фазы водности.

3.1. Расчет нормативов допустимого воздействия на верховые болота

В рамках данной статьи выполнено для примера упрощенное определение годовой величины допустимых сбросов на болото Ламмин-Суо без выбора варианта сброса. Расчет выполнен по формуле

$$m = (O - E) \times C^{\text{ОДК}}, \quad (2)$$

где m — масса привноса загрязняющего вещества в г/м²; O — слой атмосферных осадков в метрах; E — слой испарения в метрах; $C^{\text{ОДК}}$ — ориентировочно допустимая концентрация компонента в сбрасываемых сточных водах в г/м³.

В данном примере расчета нормативов допустимого воздействия (НДВ) принята интенсивность сброса очищенных сточных вод, равная интенсивности стока воды с болота в естественных условиях, при которой не наблюдается негативная трансформация болота. Под негативной трансформацией болота подразумевается: 1) активизация эрозионных процессов, проявляющаяся в появлении дополнительных звеньев внутриболотной гидросети, врезанных в торфяную толщу под воздействием сточных вод (промоины); 2) деградация первичной болотной растительности вдоль линии стекания на участке более чем 10% от общей площади болота. Интенсивность стока воды в естественных условиях определяется по величине климатического стока, рассчитанного по разности годового слоя осадков (O) и испарения (E). В соответствии с водно-балансовыми расчетами среднемноголетний слой климатического стока воды с болота за период 1950–2000 гг. составляет 445 мм или 0.445 м, а максимальный слой климатического водного стока — 720 мм соответственно (Багуев, 2018).

Расчеты НДВ проведены по среднемноголетнему и максимальному стокам воды с единицы площади болота на гектар, представленных в табл. 3. НДВ массы привноса химических веществ рассчитаны по действующим на сети Росгидромета нормативам (ПДК) и разработанным авторами ориентировочно допустимым концентрациям (ОДК). В последних графах табл. 3 приведены значения масс химических веществ, поступающих на всю площадь болотного массива.

Анализ данных табл. 3 выявляет значительные различия в величинах НДВ, рассчитанных по ПДК и ОДК, наиболее выраженных для ионов Cl, Na, Ca и нитратов. НДВ масс сбросов этих ионов должны быть в 8–10 раз ниже НДВ по действующим нормативам санитарно-гигиенических ПДК. Нормы же масс сбросов по ХПК, марганцу, цинку, меди, аммонии и общему железу могут быть в 5–50 раз выше НДВ

Таблица 3. Нормативы допустимого воздействия по годовому привносу масс химических веществ на единицу площади и со всего болотного массива Ламмин-Суо

| Компонент | НДВ ^{ПДК} кг/га срм. сток* | НДВ ^{ПДК} кг/га мнв. сток** | НДВ ^{ОДК} кг/га срм. сток | НДВ ^{ОДК} кг/га мнв. сток | НДВ ^{ОДК} тонн *** срм. сток | НДВ ^{ПДК} тонн срм. сток |
|----------------------|---|--|--|--|---|---|
| Ca-ион | 801 | 1280 | 111 | 177 | 22.2 | 160 |
| Na-ион | 757 | 1213 | 89 | 142 | 17.8 | 151 |
| Cl-ион | 1335 | 2136 | 89 | 142 | 17.8 | 267 |
| SO ₄ -ион | 445 | 712 | 220 | 352 | 44 | 99.9 |
| S | 4450 | 7120 | 890 | 1420 | 178 | 999 |
| NO ₃ -ион | 178 | 285 | 40 | 64 | 8.0 | 35.6 |
| NO ₂ -ион | 0.36 | 0.58 | 0.36 | 0.58 | 0.072 | 0.072 |
| NH ₄ -ион | 2.2 | 3.5 | 22 | 35 | 4.4 | 0.44 |
| PO ₄ -ион | 0.9 | 1.44 | 0.45 | 0.72 | 0.09 | 0.18 |
| Fe общее | 0.45 | 0.72 | 25 | 35 | 4.4 | 0.09 |
| Mn | 0.044 | 0.070 | 0.36 | 0.58 | 0.072 | 0.009 |
| Cu | 0.0018 | 0.029 | 0.022 | 0.035 | 0.0044 | 0.0009 |
| Zn | 0.044 | 0.070 | 0.19 | 0.30 | 0.02 | 0.009 |
| ХПК | 66.8 | 106.9 | 356 | 570 | 71.2 | 13.4 |
| нефтепродукты | 0.22 | 0.35 | 0.22 | 0.35 | 0.22 | 0.045 |

Примечание: * НДВ рассчитано для среднесуточного значения слоя водного стока, ** НДВ рассчитано для максимального значения слоя водного стока, *** НДВ рассчитано для среднесуточного значения слоя водного стока со всей площади болота.

по действующим нормативам рыбохозяйственных ПДК. НДВ^{ОДК} и НДВ^{ПДК} по нефтепродуктам и нитритам совпадают.

3.2. Обоснование нормативов допустимого воздействия на верховые болота

В основе разработки нормативов допустимого воздействия на болота лежит определение фоновых значений основных химических показателей олиготрофных болот независимо от их географического положения, рассчитанных по объединенным выборкам всех исследованных болот (табл. 3). На основе статистической оценки представленных данных можно сделать вывод о том, что к наиболее «устойчивым» и меняющимся в достаточно узком диапазоне концентраций химическим показателям относятся: рН, общая минерализация (15–30 мг/л), высокие содержания органического углерода (ХПК = 80–200 мгО/дм³), высокие (1–4 мг/дм³) содержания общего железа, кремния. Для биогенного состава болотных вод различных регионов страны характерны повышенные содержания аммония (до 1–3 мг/дм³)

и относительно низкие содержания минерального фосфора и нитратного азота (0.01–0.60 мг/дм³). К специфическим особенностям болотных вод относятся их ультрамалая общая минерализация (< 50 мг/дм³) на фоне малых (на пороге обнаружения) концентраций главных ионов. Минимальное содержание (< 10 мг/дм³) ионов кальция определяет тип растительности характерных олиготрофных болотных микроландшафтов: сфагновые мхи, пушица, подбел, не требовательных к богатому минеральному питанию растений.

На основе установленного гидрохимического фона верховых болот авторами разработаны ориентировочно допустимые концентрации основных компонентов химического состава сбрасываемых на болота сточных вод, позволяющих сохранить олиготрофный или мезотрофный (в зависимости от времени сброса) уровень трофности верховых болот (табл. 4). При этом порог концентраций минеральных форм и окисленных форм химических веществ (общая минерализация, главные ионы, нитратный азот, фосфор фосфатов) в сточных водах определен по верхней границе их фоновых содержаний в болотных водах. Наиболее жесткие требования к сбрасываемым сточным водам должны предъявляться к концентрациям

Таблица 4. Фоновые и ориентировочно допустимые значения ОДК гидрохимических показателей сбрасываемых на верховые болота сточных вод (число членов в выборках 50–100 членов)

| Гидрохимический показатель | Фоновые значения* | ОДК | ПДКр/х |
|--|-------------------|------|-----------|
| pH | 4.35 ± 0.17 | 6.0 | 6.5–8.5** |
| Ca-ион, мг/дм ³ | 3.5 ± 2.1 | 25 | 180** |
| Na-ион, мг/дм ³ | 3.5 ± 1.5 | 20 | 40** |
| Cl-ион, мг/дм ³ | 3.1 ± 1.2 | 20 | 300** |
| SO ₄ -ион, мг/дм ³ | 6.7 ± 3.2 | 50 | 100** |
| Σи, мг/дм ³ | 25 ± 4.5 | 200 | 1000** |
| Нитрат-ион, мг/дм ³ | 0.56 ± 0.10 | 9 | 40*** |
| Нитрит-ион, мг/дм ³ | 0.025 ± 0.01 | 0.08 | 0.08*** |
| Аммоний-ион, мг/дм ³ | 1.65 ± 1.23 | 5 | 0.50*** |
| Фосфат-ион, мг/дм ³ | 0.05 ± 0.03 | 0.10 | – |
| Fe общее, мг/дм ³ | 1.96 ± 0.74 | 5 | 0.1*** |
| Mn, мкг/дм ³ | 67 ± 35 | 80 | 10*** |
| Cu, мкг/дм ³ | 3.8 ± 1.2 | 5 | 1*** |
| Zn, мкг/дм ³ | 37.6 ± 15 | 45 | 10*** |
| ХПК, мгО/дм ³ | 160 ± 32 | 80 | 15*** |
| нефтепродукты, мг/дм ³ | 0.05 ± 0.03 | 0.05 | 0.05*** |

Примечание: *фоновые содержания рассчитаны как среднееголетние по всем исследованным болотам, ** приведены санитарно-гигиенические ПДК, *** приведены рыбохозяйственные ПДК.

ионов кальция, натрия, хлоридам и общей минерализации, которые должны быть в 5–10 раз ниже установленных санитарно-гигиенических ПДК (табл. 4). В случае сбросов сточных вод в соответствии с общепринятыми предельно допустимыми концентрациями (санитарно-гигиеническими ПДК) олиготрофная болотная растительность, адаптированная к очень низким природным концентрациям (менее 10 мг/л) деградирует и переходит к мезотрофным и в дальнейшем к эвтрофным видам. И наоборот, содержание в сточных водах таких компонентов как органическое вещество (ХПК), аммонийный азот, общее железо, тяжелые металлы должно быть регламентировано верхней границей их фоновых содержаний в болотных водах, многократно превышающих ПДК вод рыбохозяйственных водоемов. При этом отпадает необходимость очистки сточных вод до требуемых значений ПДК_{р/х}, что создает значительную экономию при очистке сточных вод. Все эти факторы были положены в основу разработки ОДК, сбрасываемых на верховые болота сточных вод, представленных в табл. 4. Как отмечалось в начале статьи, обеспечение минимизации антропогенного воздействия на болота при различных видах хозяйственного использования вызывает необходимость разработки нормативов допустимого воздействия по сбросу воды и привносу загрязняющих веществ. В них должны быть отражены состояние внутриболотной гидрографической сети и способ сброса очищенных сточных вод (концентрированный, рассеянный на поверхность или в торфяную залежь, в центр болота или окрайки). Перечисленные условия могут быть учтены при планировании оптимального варианта сбросов с помощью математического моделирования (Лавров, 2018).

4. Заключение

Результаты выполненных исследований позволяют сделать следующие основные выводы. Несмотря на различное территориальное положение олиготрофных болотных массивов, их гидрохимический режим и химический состав воды во многом сходен. Поэтому приведенные в статье фоновые содержания основных гидрохимических показателей могут быть приняты для всех верховых болот различных регионов России. При расчетах НДС для сохранения болот должны приниматься более гибкие комбинированные критерии по концентрации сбрасываемых загрязняющих веществ по сравнению с реками и озерами. Применение предложенных авторами более гибких критериев по концентрациям сбрасываемых загрязняющих веществ позволяет как минимизировать степень антропогенных нарушений болот, так и существенно снизить затраты на очистку сточных вод от ряда химических веществ, характерных для естественного фона верховых болот.

Литература

- Алекин, О. А. (1970). *Основы гидрохимии*. Ленинград: Гидрометеиздат.
- Батуев, В. И. (2018). Водный баланс. В: В. И. Батуев, С. М. Новиков, под ред. *Гидрометеорологический режим и водный баланс верховых болот Северо-Запада России (на примере болота Ламмин-Суо)*. Санкт-Петербург: Победа, 234–256.
- Иванов, К. Е. (1975). *Водообмен в болотных ландшафтах*. Ленинград: Гидрометеиздат.
- Инишева, Л. И., Инишев, Н. Г. (2001). Элементы водного баланса и гидрохимическая характеристика болотно-таежной подзоны Западной Сибири. *Водные ресурсы*, 28 (4), 410–417.

- Калужный, И. Л. (1999). Оценка выноса органического вещества водами олиготрофного болотного массива. *Метеорология и гидрология*, (11), 98–104.
- Лавров, С. А. (2018). Математическое моделирование процесса распространения сточных вод и загрязняющих веществ при их сбросе на болота. *Водное хозяйство России*, (2), 57–77. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2018-2-5>
- Ларгин, И. Ф., Тюремнов, С. Н. (1966). Изменения химического состава вод торфяных болот в зависимости от условий их залегания. *Труды Государственного гидрологического института*, (135), 223–241.
- Никаноров, А. М. (2011). *Региональная гидрохимия*, Ростов-на-Дону: НОК.
- Перечень предельно допустимых концентраций и ориентировочно безопасных уровней воздействия вредных веществ для воды рыбохозяйственных водоемов*. (1995). Москва: Роскомрыболовство.
- Порядок проведения расчета условных фоновых концентраций химических веществ в воде водных объектов для установления нормативов сбросов сточных вод*. (2017). РД 52.24.622-2017. Москва, Ростов-на-Дону: Росгидромет, Гидрохимический институт.
- Потапова, Т. М. (1991). Основные факторы формирования химического состава вод немелиорированных олиготрофных болот. *Гидрохимические материалы*, (110), 3–16.
- Савичев, О. Г. (2015). Геохимические показатели болотных вод в таежной зоне Западной Сибири. *Известия РАН. Серия географическая*, (4), 47–57.
- Физическая геохимия*. (1968). Москва: Химия.
- Eckstein, Y., Savichev, O. G. and Pasechnik, E. Y. (2015). Two decades of trends in ground water chemical composition in The Great Vasyugan Mire, Western Siberia, Russia. *Environmental Earth Sciences*, (1), 3–15. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3908-z>
- Jakob, A. (1997). Modelling solute transport using the double porous medium approach. *Modelling in aquatic chemistry*, 525–576.
- Lasaga, A. (1995). In: A. F. White, S. L. Brantley, ed., *Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals*, vol. 31 of *Reviews in Mineralogy*. Washington, DC: Mineralogical Society of America, 23–86.

Статья поступила в редакцию 16 апреля 2019 г.

Статья рекомендована к печати 15 июня 2020 г.

Контактная информация:

Потапова Татьяна Михайловна — ptm2000@mail.ru

Марков Михаил Леонидович — 2019mml@gmail.com

Задонская Ольга Викторовна — olga.zadonskaya@hydrology.ru

The establishment of the background of raised bogs in various regions of Russia for justification of permissible impact standards*

T. M. Potapova¹, M. L. Markov², O. V. Zadonskaya²

¹ St. Petersburg State University,
7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

² State Hydrological Institute,
23, 2-ia liniia V. O., St. Petersburg, 199053, Russian Federation

For citation: Potapova T. M., Markov M. L., Zadonskaya O. V. (2020). The establishment of the background of raised bogs in various regions of Russia for justification of permissible impact standards. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 65 (3), 455–467. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.303> (In Russian)

* The work was supported by the Federal Target Program of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation, “Development of the water sector of the Russian Federation in 2012–2020”.

The purpose of the work is to establish the basic laws of the formation of the hydrochemical background for the development of standards of permissible impact on raised bogs. Research methods included physical and chemical analysis, water balance calculations and statistical processing of analytical data. The hydrochemical background of raised bogs was established based on materials of generalization of hydrochemical data of the typical and most studied bogs of the Leningrad (Lammin-Suo swamp), Arkhangelsk (Ilaskoe swamp) and Tomsk (Vasyugan swamp) Oblasts. The spatial and seasonal variability of the main ingredients of chemical composition (main ions, biogenic elements, organic matter and heavy metals) of marsh waters was investigated. The hydrochemical background was calculated using the combined samples' mean annual values of concentrations of all investigated raised bogs. It is acceptable in view of the absence of statistically significant differences between intra-annual hydrochemical indicators of oligotrophic microlandscapes of raised bogs. For the purpose of preserving the oligotrophic nutrient status of raised bogs, maximum permissible concentrations (MPC) of chemicals in discharged sewage were developed. On the basis of water-balance calculations, a simplified definition of the permissible mass of the introduction of chemicals from sewage discharge was performed. Significant differences were revealed in the values of the standards of permissible impact (SPI) using the generally accepted maximum permissible concentrations (MPC) and the approximately allowable concentration (AAC) developed by the authors. The SPI calculated by the AAC for the main ions, total mineralization and nitrates was 5 times lower; and for organic substances, ammonium and total iron — 5–50 times more than calculated by LPC. Thus, the use of more flexible criteria for the concentrations of discharged pollutants makes it possible to both minimize the degree of anthropogenic disturbances of raised bogs, and significantly reduce the cost of wastewater treatment from a number of chemical substances of the bogs' natural background.

Keywords: raised bogs, chemical composition, background parameters.

References

- Alekin, O. A. (1970). *Basics of hydrochemistry*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. (In Russian)
- Batuev, V. I. (2018). Water balance. In: V. I. Batuev, S. M. Novikov, ed., *Hydrometeorological regime and water balance of the bogs of the North-West of Russia (on the example of the Lammin-Suo swamp)*, St. Petersburg: Pobeda Publ., 234–256. (In Russian)
- Eckstein, Y., Savichev, O. G. and Pasechnik, E. Y. (2015). Two decades of trends in ground water chemical composition in The Great Vasyugan Mire, Western Siberia, Russia. *Environmental Earth Sciences*, (1), 3–15. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3908-z>
- Inisheva, L. I. and Inishev, N. G. (2001). Elements of water balance and hydrochemical characteristics of swamps of the South taiga subzone of Western Siberia. *Water Resources*, 28 (4), 410–417. (In Russian)
- Ivanov, K. E. (1975). *Water exchange in the mire landscapes*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. (In Russian)
- Jakob, A. (1997). Modelling solute transport using the double porous medium approach. *Modelling in aquatic chemistry*, 525–576.
- Kalyuzhnyy, I. L. (1999). Assessment of organic matter removal by the waters of the oligotrophic swamp massif. *Meteorologiya i Gidrologiya*, (11), 98–104. (In Russian)
- Largin, I. F. and Tyuremnov, S. N. (1966). Changes in the chemical composition of the waters of the peat bogs depending on the conditions of their occurrence. *Trudy Gosudarstvennogo gidrologicheskogo instituta*, (135), 223–241. (In Russian)
- Lasaga, A. (1995). In: A. F. White, S. L. Brantley, ed., *Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals*, vol. 31 of *Reviews in Mineralogy*. Washington, DC: Mineralogical Society of America, 23–86.
- Lavrov, S. A. (2018). Mathematical simulating of the waste water and pollutants spreading after their discharge from a bog. *Water Sector of Russia*, (2), 57–77. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2018-2-5> (In Russian)
- Nikanorov, A. M. (2011). *Regional hydrochemistry*, Rostov-on-Don: NOC Publ. (In Russian)
- Physical Geochemistry*. (1968). Moscow: Khimiia Publ. (In Russian)

- Potapova, T. M. (1991). The main factors of formation of chemical composition of waters of non-reclaimed oligotrophic bogs. *Gidrokhimicheskie materialy*, (110), 3–16. (In Russian)
- Savichev, O. G. (2015). Geochemical indicators of swamp water in the taiga zone of Western Siberia. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk, Seriya Geograficheskaya*, (4), 47–57. (In Russian)
- The list of maximum permissible concentrations and approximately safe levels of exposure to harmful substances for the water of fishery water bodies.* (1995). Moscow: Roskomrybolovstvo Publ. (In Russian)
- The procedure for calculating the conditional background concentrations of chemicals in water of water bodies to establish standards for wastewater discharges.* (2017). RD 52.24.622-2017. Moscow, Rostov-on-Don: Rosgidromet, Gidrokhimicheskii institut Press. (In Russian)

Received: April 16, 2019

Accepted: June 15, 2020

Contact information:

Tatyana M. Potapova — ptm2000@mail.ru

Michael L. Markov — 2019mml@gmail.com

Olga V. Zadonskaya — olga.zadonskaya@hydrology.ru