

УДК 556.531.4:550.84.094

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4799

Шифр специальностей ВАК: 1.6.4, 1.6.6, 1.6.21

Определение геохимической устойчивости болотных экосистем таежной зоны Западной Сибири к антропогенному влиянию

О.Г. Савичев[✉], Е.Ю. Пасечник

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

[✉]OSavichev@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* определяется необходимостью научно обоснованного нормирования воздействий на болотные экосистемы с учетом их специфики и геохимической устойчивости. *Цель:* определение геохимической устойчивости болот таежной зоны Западной Сибири к поступлению загрязняющих веществ для двух характерных случаев, связанных: 1) с эксплуатацией шламовых амбаров; 2) сбросом хозяйственно-бытовых и производственных сточных вод. *Методы:* методы математического моделирования, статистические методы. *Результаты и выводы.* Выполнен анализ результатов исследований химического состава болотных вод и вытяжек из торфов и минеральных грунтов болот таежной зоны Западной Сибири (преимущественно, на территории Томского района, а также прилегающих территориях Ханты-Мансийского автономного округа, Новосибирской и Омской областей). Получены оценки средних значений геохимических показателей болотных вод и торфов по глубине торфяной залежи в торфяных болотах с разной степенью антропогенного воздействия. Предложена методика оценки антропогенного влияния на болота сброса сточных вод и геомиграции на участках размещения объектов нефтегазового комплекса (допустимые концентрации в сточных водах, поступающих в болотные экосистемы) с учетом «геохимического фона» и сорбционной способности торфов. В том числе обоснован и апробирован способ оценки значений допустимых концентраций, которые следует рассматривать как «относительно безопасный» уровень воздействия на болотные экосистемы, при котором не ожидается вторичного загрязнения болотных вод. Показано, что антропогенные изменения в основном ограничены по вертикали верхним слоем торфяной залежи до 1–2 м, а по горизонтали (в пределах деятельного горизонта торфяной залежи) – участками до 100–200 м.

Ключевые слова: геохимическое состояние, влияние сточных вод, допустимое антропогенное воздействие, болотные воды, Западная Сибирь, таежная зона

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 23-27-00039).

Для цитирования: Савичев О.Г., Пасечник Е.Ю. Определение геохимической устойчивости болотных экосистем таежной зоны Западной Сибири к антропогенному влиянию // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 10. – С. 189–202. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4799

UDC 556.531.4:550.84.094

DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4799

Determination of geochemical stability of swamp ecosystems of the taiga zone of Western Siberia to anthropogenic impact

O.G. Savichev[✉], E.Yu. Pasechnik

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

[✉]OSavichev@mail.ru

Abstract. Relevance. The need for scientifically based regulation of impacts on wetland ecosystems taking into account their specificity and geochemical stability. **Aim.** To determine the geochemical stability of wetlands in the taiga zone of Western Siberia to pollutants for two typical cases associated with: 1) operation of sludge pits; 2) discharge of domestic and industrial

wastewater. **Methods.** Mathematical modeling, statistical methods. **Results and conclusions.** The authors have carried out the analysis of the results of studies of the chemical composition of wetland waters and extracts from peat and mineral soils of wetlands in the taiga zone of Western Siberia (mainly in the Tomsk region, as well as in the adjacent territories of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug, Novosibirsk and Omsk regions). They obtained the estimates of the average values of geochemical indicators of wetland waters and peat by the depth of the peat deposit in peat bogs with varying degrees of anthropogenic impact. The paper introduces the method for assessing the anthropogenic impact of wastewater discharge and geomigration on swamps in areas where oil and gas facilities are located (permissible concentrations in wastewater entering swamp ecosystems), taking into account the «geochemical background» and sorption capacity of peat. In particular, the authors substantiated and tested the method for assessing the values of permissible concentrations, which should be considered as a «relatively safe» level of impact on swamp ecosystems, at which secondary pollution of swamp waters is not expected. It is shown that anthropogenic changes are mainly limited vertically by the upper layer of the peat deposit up to 1–2 m, and horizontally (within the active horizon of the peat deposit) – by areas up to 100–200 m.

Keywords: geochemical state, wastewater impact, permissible anthropogenic impact, swamp waters, Western Siberia, taiga zone

Acknowledgements: The research was carried out using the RSF grant (project no. 23-27-00039).

For citation: Savichev O.G., Pasechnik E.Yu. Determination of geochemical stability of swamp ecosystems of the taiga zone of Western Siberia to anthropogenic impact. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 10, pp. 189–202. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4799

Введение

В Российской Федерации на сильно заболоченных территориях Западной Сибири сосредоточена значительная часть запасов нефти и газа. Торфяные болота, под которыми, согласно [1, 2], понимаются природные образования в виде насыщенных водой и покрытых специфической растительностью отложений торфа [1–4] толщиной 0,3 м и более в неосушенном состоянии, занимают 20–40 % водосборов многих крупных притоков р. Оби [3–9]. В процессе добычи и транспортировки нефти и газа возможны ситуации, связанные с загрязнением болотных экосистем, в частности, при: 1) плановом размещении объектов обустройства месторождений, например, шламовых амбаров; 2) при плановом и аварийном сбросах сточных (очищенных и неочищенных) вод; 3) атмосферном загрязнении в результате плановых и аварийных выбросов; 4) чрезвычайных ситуациях при строительстве и эксплуатации разведочных и эксплуатационных скважин, промысловых и магистральных трубопроводов и иных объектов [10–22]. Негативные воздействия также могут быть связаны с деятельностью жилищно-коммунального хозяйства населенных пунктов и иных предприятий, а также с рядом других причин [15, 23–26]. Все это обуславливает необходимость более тщательного обоснования различных видов хозяйственной деятельности [27–29], что и определило цель рассматриваемого исследования – оценку геохимической устойчивости болот таежной зоны Западной Сибири к поступлению загрязняющих веществ для двух характерных случаев, связанных: 1) с эксплуатацией шламовых амбаров; 2) сбросом сточных вод.

Для достижения этой цели были рассмотрены следующие задачи: 1) оценка средних значений геохимических показателей болотных и сточных

вод в южно- и среднетаежной подзонах Западной Сибири (преимущественно, в пределах Томского района); 2) построение математических моделей распространения загрязняющих веществ с учетом описания основных процессов и максимальной совместимости с существующими системой экологического мониторинга и методологией нормирования сбросов [30]; 3) оценка условий распространения характерных загрязняющих веществ (Na^+ и Cl^-) на примере типовых для таежной зоны Западной Сибири объектах. В последнем случае выбор именно Na^+ и Cl^- обусловлен их распространенностью в сточных водах (подземные воды с высоким содержанием указанных элементов используются при поддержании пластового давления; в хозяйственно-бытовых стоках их содержание также повышено, как в результате дезинфекции, так и вследствие более высоких концентраций в исходных питьевых водах из палеогеновых отложений), значительной миграционной способностью, что позволяет оценить максимальную зону воздействия, а также экономической целесообразностью при проведении экологического мониторинга.

Объекты и методика исследования

Болота – весьма специфические во многих отношениях объекты со свойствами, характерными для поверхностных и подземных водных объектов (в большинстве случаев на болотах акватория – «водное пространство в пределах естественных, искусственных или условных границ» [31. С. 1] – отсутствует, более того, значительная часть болот покрыта древесной и кустарниковой растительностью, по характеру движения болотные воды ближе к подземным, а не к поверхностным водам, но их нельзя рассматривать как «верховодку», поскольку болото по определению не может функционировать

без болотных вод), лесных экосистем и почвенного покрова, что обуславливает некоторую неопределенность в подходах к их использованию (могут выступать одновременно как объекты земле-, водо-, недро- и лесопользования, а ущерб при авариях на болотах оценивается с использованием методик, разработанных для минеральных почв) и изучению.

В настоящее время достаточно подробно разработаны способы оценки гидрохимического фона и допустимых сбросов загрязняющих веществ в моря, реки, озера и водохранилища. Тем не менее при оценке соответствующих показателей болот остается много вопросов, в том числе в части определения параметров основного уравнения для оценки допустимой концентрации вещества в сточных водах C_{lim} , поступающих в водный объект (1):

$$C_{lim} = k_n \cdot (C_{n,lim} - C_b) + C_b, \quad (1)$$

где $C_{n,lim}$ и C_b – предельно допустимая (устанавливаемая нормативно для каждого вида водопользования) и фоновая концентрация; k_n – кратность общего разбавления. Например, каким образом оценить величину C_b с учетом разных типов болот и многообразия химического состава болотных вод? Даже «обычное» требование к снижению концентраций тех или иных веществ в болотных водах в целом не применимо, поскольку означает усиление выноса веществ, образующихся в процессе формирования торфов, а следовательно, деградацию торфяного болота, что не допускается действующим российским законодательством. С учетом этого и принимая во внимание рекомендации, изложенные в [32–36], для описания распространения загрязняющих веществ в торфяном болоте нами использован следующий подход [37–41]:

1. В структуре торфяной залежи (естественного напластования отдельных видов торфа – органической горной породы, образующейся в результате отмирания и неполного распада болотных растений в условиях повышенного увлажнения при недостатке кислорода и содержащей не более 50 % минеральных компонентов на сухое вещество [2]) по фильтрационным свойствам могут быть выделены: 1) деятельный и 2) инертный горизонты (по [1, 42]). В пределах деятельного горизонта глубиной 0,2–0,6 м преобладает адвективный и адвективно-диффузионный перенос, причем скорости горизонтального переноса могут быть существенно выше, чем вертикального; в ниже расположенном инертном горизонте в зависимости от типа торфяной залежи наблюдается в случае верховых болот постепенное уменьшение интенсивности диффузионного переноса от поверхности к минеральному дну (на верховых болотах), или в случае низинных болот – диффузионный перенос с выходами подземных вод, включая напорные [39, 40].

2. С учетом относительно постоянного или слабо меняющегося ботанического и химического состава торфов рассматривается одномерный стационарный процесс в соответствии с уравнениями (2), (3):

$$D_{h,n} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial n^2} - v_n \cdot \frac{\partial C}{\partial n} + k_a \cdot f(C) = 0, \quad (2)$$

$$f(C) = k_r \cdot (C_e - C), \quad (3)$$

где n – направление основного распространения веществ: x – по горизонтали в деятельном горизонте; z – по вертикали в инертном горизонте в пределах условно однородного (по ботаническому и химическому составу) слоя; v_n и $D_{h,n}$ – скорость движения воды и коэффициент гидродисперсии в n -направлении; в первом приближении величина $D_{h,n}$ линейно пропорциональна скорости v_n ; k_a – активная пористость; C – фактическая концентрация вещества в водной среде; k_r – удельная скорость изменения C ; C_e – концентрация, соответствующая решению уравнения (4) в виде (5), учитывающем сорбционные процессы по Лэнгмюру и приближение к локальному равновесию относительно содержаний в водной среде (5) и водовмещающих отложениях (6) при отсутствии внешних воздействий [38, 39, 41]:

$$f(C) = k_{p1} \cdot (k_{p2} \cdot C_{eq} - C) + k_s \cdot (S - k_m \cdot (S_m - C) \cdot C) = 0, \quad (4)$$

$$C_e = \frac{k_{p1} \cdot k_{p2} \cdot C_{eq} + k_s \cdot S}{k_{p1} + k_s \cdot k_m \cdot (S_m - S)} = \frac{k_{p1} \cdot k_{p2} \cdot C_{eq} + k_s \cdot S}{k_r}, \quad (5)$$

$$S_e = \frac{\frac{k_{p1}}{k_s} (C - k_{p2} \cdot C_{eq}) + k_m \cdot S_m \cdot C}{1 + k_m \cdot C}, \quad (6)$$

$$S_m = S_{m,0} \cdot \rho H^{k(pH)}, \quad (7)$$

где k_{p1} – удельная скорость изменения концентрации C в зависимости от отклонения от равновесной концентрации C_{eq} , которая при ряде допущений может оцениваться как среднее геометрическое (в предположении, что концентрации C распределены по логнормальному закону, и рассматривается обобщенное уравнение химических реакций в водной среде в условно равновесных условиях $\Delta G_T = R \cdot T \cdot (\sum \Pi_i - \ln K_T^0)$, которое для конкретного вещества C_c приводится к виду $\ln C_c = b_0 + \sum b_j \cdot \ln C_j$, где ΔG_T и K_T^0 – общее изменение свободной энергии и суммарная константа равновесия при температуре T ; b_0 , b_j – константы), что фактически используется в гидрогеохимических поисках [43] либо как среднее арифметическое при нормировании сбросов в поверхностные водные объекты. В последнем случае используется коэффициент k_{p2} – отношение среднего геометрического к среднему арифметическому (при использовании среднего геометрического $k_{p2}=1$); k_s , k_m – коэффициен-

ты, учитывающие изменение концентрации вещества в растворе в зависимости от содержания в торфах S (с учетом разности единиц измерения); S_m – максимальная сорбционная способность торфов, которая, как показали исследования болот Западной Сибири [38–41], связана с величиной pH водных вытяжек из торфов (6), где $S_{m,0}$ и $k(pH)$ – коэффициенты.

3. Частное аналитическое решение уравнения (2) может быть получено в виде (8):

$$C_n = C_{e,n} + (C_{0,n} - C_{e,n}) \cdot \exp(\varphi \cdot n), \quad (8)$$

$$\varphi = \frac{v_n}{2 \cdot D_n} \cdot \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4 \cdot k_r \cdot k_a \cdot D_n}{v_n^2}} \right), \quad (9)$$

где $C_{0,n}$ – начальная концентрация вещества в водной среде слоя в направлении n , в том числе концентрация C_{ws} в сточных водах. При этом следует отметить, что, как показал анализ результатов ранее выполненных исследований [24, 25, 37, 39, 40], использование уравнения (8) имеет практический смысл, прежде всего, при изучении (горизонтального) распространения загрязняющих веществ в деятельном горизонте торфяной залежи. Расчет вертикального переноса с учетом структуры торфяной залежи и дискретности свойств отдельных слоев может быть органичен оценкой параметров уравнений (5)–(7) и определением концентраций C или S по известным или предполагаемым значениям S и C , соответственно [25, 38–40].

4. Расчет по уравнению (1) допустимой концентрации вещества в сточных водах C_{lim} , поступающих в болотные воды, весьма затруднителен в части определения и фоновых концентраций (с учетом строения торфяной залежи и ее пространственной неоднородности), и кратности разбавления. По этой причине нами использован способ, основанный на совмещении уравнения (8) для горизонтального переноса и критерия Стьюдента [41], исходя из сопоставимости процедур оценки C_{lim} и проверки на однородность двух выборок – «фоновых» концентраций C_b и суммы «фона» и постоянной добавки ΔC_{ws} . Если допустить, что $C_b \approx C_e$, а наибольшее допустимое воздействие соответствует $S = S_m$, при оценке допустимой концентрации C_{lim} в сточных водах должно выполняться условие (10) или его модификация в виде (11):

$$\frac{|C_{lim} - C_e|}{\sqrt{2 \cdot \frac{\sigma^2}{N}}} = \frac{(C_{lim} - k_{p2} \cdot C_{eq} - S_m \cdot \frac{k_s}{k_{p1}}) \cdot \exp(\varphi \cdot x)}{\sqrt{2 \cdot \frac{\sigma^2}{N}}} < t_\alpha, \quad (10)$$

$$C_{lim} < k_{p2} \cdot C_{eq} \times \left(1 + \frac{k_s \cdot S_m}{k_{p1} \cdot k_{p2} \cdot C_{eq}} + \sqrt{2} \cdot \delta \cdot t_\alpha \cdot \exp(-\varphi \cdot x) \right), \quad (11)$$

где t_α – коэффициент Стьюдента при уровне значимости α ; N – объем выборки; σ – среднее квадратическое отклонение; δ – погрешность определения «фона». Если рассматривается случай загрязнения болота с поверхности (например, при аварийном сбросе), то концентрация, которая не приведет к значимому загрязнению торфов и болотных вод, оценивается по уравнению (11) при $x=0$.

5. Ранее [38] модель (2)–(9) была апробирована по данным о кислотных (с использованием азотной кислоты) и водных вытяжках из торфов верхового участка (сосново-кустарничково-мохового болота – «ряма») в восточной части одного из крупнейших в мире Васюганского болотного комплекса [3, 6, 7], а также на территории водосбора озера Поян в Китае в воде и водных вытяжках из отложений ветландов [41, 44, 45]. Сходимость расчетных и измеренных значений концентраций изученных веществ оценивалась по условию:

$$Kr_{sim} = \sqrt{\frac{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})^2}{(N-1) \cdot D_{obs}}} \leq 0,8, \quad (12)$$

где Y_{obs} и Y_{sim} – измеренные и расчетные значения величины Y ; D_{obs} – дисперсия измеренных значений Y ; N – объем выборки.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования уравнений (2)–(9) для описания распространения изученных веществ (главные ионы, редкоземельные элементы) в торфяной залежи. Однако нельзя однозначно интерпретировать связь между составом воды и водных вытяжек из торфов, с одной стороны, и составом водных и кислотных вытяжек из торфов, с другой, по причине существенных различий в составе болотных вод, торфов, водных и кислотных вытяжек из торфов, в том числе с учетом разных методов определения [46–51].

С учетом этого нами в рассматриваемой работе использованы данные о составе болотных вод и кислотных вытяжек из торфов применительно к двум случаям при расчете: 1) горизонтального переноса от выпуска сточных вод или шламового амбара – по данным в слое 0,0–0,25 м, где наблюдаются относительно максимальные скорости адвективного переноса [39, 42]; 2) вертикального переноса по глубине торфяной залежи – по данным о составе болотных вод в слое 0,0–0,25 м и кислотных вытяжек (с использованием азотной кислоты [39]) по интервалам 0,25 от поверхности болота до минеральных грунтов включительно. Соответствующие исследования были выполнены в Томском политехническом университете (ТПУ) под руководством и при непосредственном участии авторов в период с 2001 по 2021 гг. с учетом требований [43, 52–55]. Районы исследования располо-

жены на верховых участках Васюганского болота у села Полынянка [37–39, 52] и в верховом болоте в водосборе р. Васюган [14, 52], на участках низинного Обского болота у сел Нашеково (принят как фоновый участок без явного антропогенного загрязнения) и Мельниково (участок многолетнего сброса хозяйственно-бытовых стоков, образующихся при использовании подземных вод палеогенового комплекса (минерализация 0,7–1,1 г/дм³) в районе, прилегающем к северной оконечности Томь-Колыванской складчатой зоны с поправкой на влияние р. Оби [24, 25, 37, 40, 52]). При проведении исследований также использовались опубликованные материалы других авторов и организаций о структуре и свойствах торфяных залежей [6, 7, 56–59]. Схема размещения участков послонного изучения состава торфяной залежи приведена на рис. 1.

6. В рамках общей оценки химического состава болотных и сточных вод, а также растворов в шламовых амбарах было проведено обобщение

результатов ранее выполненных исследований на территории Томского района и прилегающих участках Новосибирской, Омской областей и Ханты-Мансийского округа [14, 15], дополненных неопубликованными материалами, в том числе полученными в последние годы до 2023 г. включительно. Методика отбора проб и определения их состава приведена в [24, 25, 40]. Погрешности δ_A определения среднего арифметического A рассчитаны по формуле (13), верхняя граница G_1 среднего геометрического G – по формуле (14):

$$\delta_A \approx \frac{\sigma_C}{\sqrt{N}}, \quad (13)$$

$$G_1 = G \cdot \exp\left(\frac{\sigma_{\ln C}}{\sqrt{N}}\right), \quad (14)$$

где σ_C и $\sigma_{\ln C}$ – средние квадратические отклонения концентраций C и их натуральных логарифмов $\ln C$; N – объем выборки.

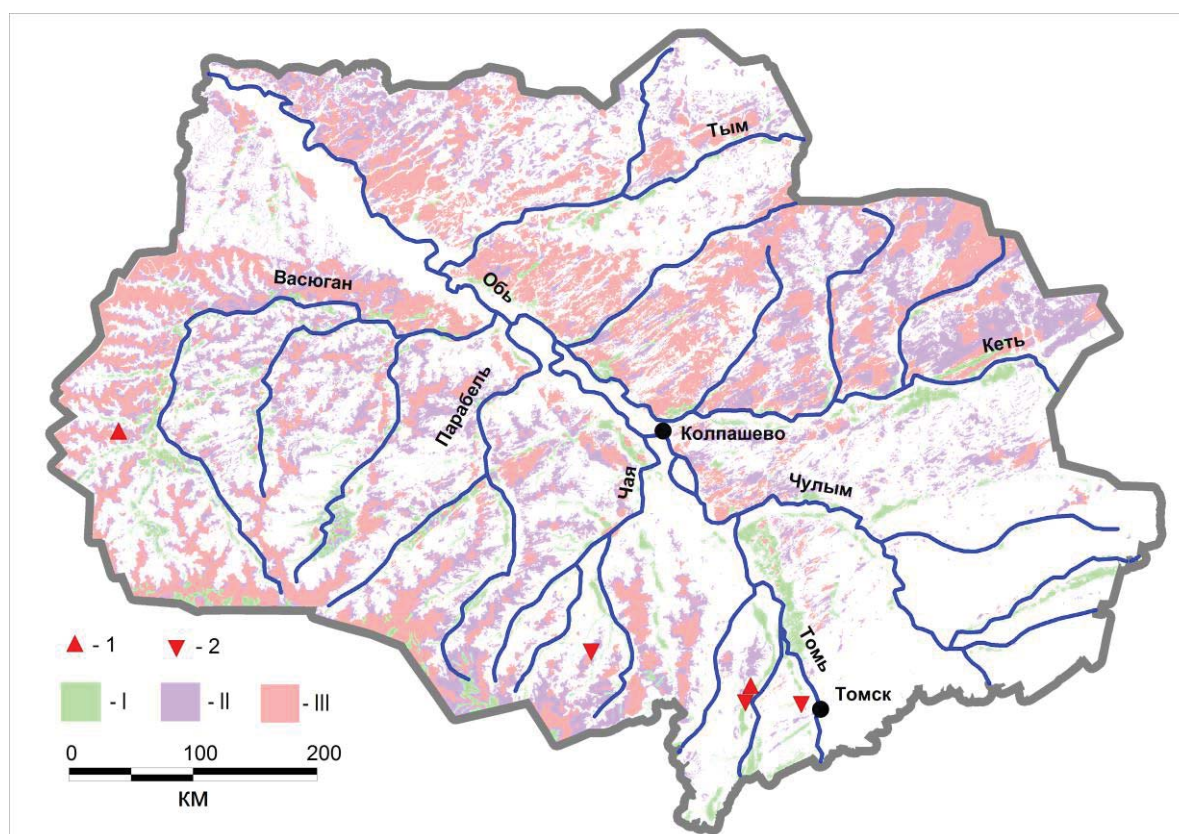


Рис. 1. Схема размещения участков исследования; условные обозначения: участки исследований распространения загрязняющих веществ по: 1 – плоскости в деятельном горизонте торфяной залежи (в водосборе р. Ягыльях, система «Ягыльях–Васюган–Обь»; Обское болото у села Мельниково); 2 – вертикали (Обское болото у сел Нашеково и Мельниково, Тимирязевское болото у г. Томска, восточный участок Васюганского болота у с. Полынянка); типы болот: I – низинные; II – переходные; III – верховые

Fig. 1. Layout of study sites; legend: study sites of pollutant distribution: 1) along the plane in the active horizon of the peat deposit (in the Yagylyakh basin, the Yagylyakh river – the Vasyugan river – the Ob river system; the Obskoe fen near the Melnikovo village); 2) vertically (the Obskoe fen near the Nashchekovo and Melnikovo villages, the Timiryazevskoe bog near the city of Tomsk, the eastern section of the Vasyugan bog near the Polynyanka village); peat bog types: I – low-moor; II – transition-moor; III – high moor

Результаты исследования и их обсуждение

С учетом требований [60], в пределах рассматриваемой территории в среднем водный раствор шламовых амбаров характеризуется как соленый (минерализация 10–50 г/дм³), хозяйственно-бытовые сточные воды, поступающие в болота, солоноватые (минерализация 1–10 г/дм³), в то время как болотные воды всех типов – пресные (минерализация до 1 г/дм³). По классификациям О.А. Алекина [61]: воды шламовых амбаров – «солоноватые», хлоридные натриевые III-го типа; хозяйственно-бытовые (если точнее – преимущественно хозяйственно-бытовые, но с примесью ливневых и производственных) – также «солоноватые», но хлоридные кальциевые I-го типа; болотные воды: низинных болот – пресные со средней минерализацией, гидрокарбонатные кальциевые III-го типа; переходных и верховых бо-

лот – «пресные» с очень малой минерализацией, гидрокарбонатные кальциевые III-го типа (табл. 1, 2), с закономерным уменьшением суммы главных ионов от переходных болот к верховым. Соответственно, обнаружение болотных вод с минерализацией более 0,5 г/дм³ и с повышенными (абсолютно и относительно) содержаниями Na⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ уже является основанием для необходимости оценки антропогенного влияния на болотные экосистемы, особенно в болотах переходного и верхового типов. Причем, судя по результатам сопоставления различных водных объектов [52, 62], этот вывод может рассматриваться как наиболее обоснованный и отражающий базовые постулаты теории формирования химического состава вод природно-техногенных объектов [34–36, 62].

Таблица 1. Среднемноголетний химический состав антропогенных вод

Table 1. Average long-term chemical composition of anthropogenic waters

Показатель Index	Ед. изм. Units	Шламовые амбары Drilling waste storage				Сточные воды Wastewater			
		A	δ_A	G	G ₁	A	δ_A	G	G ₁
pH	ед. pH pH units	7,99	0,59	7,89	8,48	7,49	0,08	7,48	7,56
Σ_{mi}	мг/дм ³ mg/dm ³	11250,2	6933,2	4013,9	6262,9	2213,2	600,1	1240,4	1528,9
Ca ²⁺	то же the same	449,9	303,2	130,6	208,6	81,7	30,0	64,7	88,7
Mg ²⁺	-//-	27,9	9,0	20,1	26,8	15,0	3,2	13,1	16,0
Na ⁺	-//-	2124,7	1344,1	948,5	1490,0	58,3	40,2	26,8	44,0
K ⁺	-//-	202,2	142,7	48,1	77,7	6,2	3,7	3,7	5,9
HCO ₃ ⁻	-//-	338,3	106,1	190,7	251,9	391,4	74,2	186,2	220,0
Cl ⁻	-//-	3874,4	2291,8	1297,4	2002,8	752,1	297,7	104,6	135,8
SO ₄ ²⁻	-//-	388,1	313,3	6,0	10,0	17,6	3,4	11,5	13,5
NO ₃ ⁻	-//-	4,96	1,72	3,64	4,91	3,96	1,70	0,81	1,07
NO ₂ ⁻	-//-	0,03	0,02	0,01	0,01	0,42	0,20	0,01	0,01
NH ₄ ⁺	-//-	1,59	0,53	1,17	1,57	38,26	12,30	10,69	13,48
F ⁻	-//-	-	-	-	-	0,99	0,43	0,13	0,18
Si	-//-	7,32	2,03	6,62	8,61	13,72	1,77	10,03	11,35
Fe	-//-	19,277	11,740	4,724	7,349	3,239	0,974	1,518	1,897
Al	мкг/дм ³ mkg/dm ³	-	-	-	-	2,5	0,0	2,5	2,5
Cu	то же the same	7,2	4,6	4,2	6,9	1,9	0,3	1,8	2,2
Zn	-//-	33,6	17,0	24,8	37,7	-	-	-	-
Pb	-//-	0,38	0,37	0,02	0,04	-	-	-	-
БПК ₅ BOD ₅	мгО ₂ /дм ³ mgO ₂ /dm ³	-	-	-	-	135,29	30,73	80,56	97,66
ПО/РО	мгО/дм ³ mgO/dm ³	62,70	13,59	54,12	66,33	187,40	70,99	96,84	133,59
БО/ДО	мгО/дм ³ mgO ₂ /dm ³	207,77	37,66	199,90	238,62	323,23	72,79	212,19	257,28
Нефтепродукты Petroleum products	мг/дм ³ mg/dm ³	-	-	-	-	0,269	0,140	0,036	0,049

Примечание: A и δ_A – среднее арифметическое и погрешность его определения (13); G и G₁ – среднее геометрическое и принятый в работе верхний предел его изменения по (14); Σ_{mi} – сумма главных ионов (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, CO₃²⁻, Cl⁻, SO₄²⁻); БПК₅, ПО и БО – биохимическое потребление за 5 суток, перманганатная и бихроматная окисляемость; прочерк означает отсутствие данных.

Note: A and δ_A are the arithmetic mean and the error in its determination (13); G and G₁ are the geometric mean and the upper limit of its change adopted in the work according to (14); Σ_{mi} is the sum of the main ions (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, CO₃²⁻, Cl⁻, SO₄²⁻); BOD₅, PO and DO are the biochemical consumption for 5 days, permanganate and dichromate oxidizability; a dash means no data.

Таблица 2. Среднемноголетний химический состав болотных вод в подзоне южной тайги без признаков явного загрязнения

Table 2. Average long-term chemical composition of swamp waters in the southern taiga subzone without signs of obvious pollution

Показатель Index	Ед. изм. Units	Низинные болота Low-moor peat bogs (fens)			Переходные болота Transition-moor peat bogs			Верховые болота High-moor peat bogs		
		A	δ_A	G	A	δ_A	G	A	δ_A	G
pH	Ед. pH pH units	6,27	0,15	6,15	4,90	0,16	4,78	4,49	0,10	4,41
Σ_{mi}	мг/дм ³ mg/dm ³	293,5	33,9	157,0	63,7	11,0	38,1	36,2	4,9	23,7
Ca ²⁺	то же the same	49,8	6,6	23,2	10,1	1,8	5,9	8,4	1,1	4,8
Mg ²⁺	—/—/—	12,4	1,5	7,5	3,2	0,6	1,8	3,3	0,5	1,4
Na ⁺	—/—/—	7,9	1,1	4,4	3,0	0,6	1,4	1,5	0,3	0,7
K ⁺	—/—/—	1,8	0,2	1,1	1,6	0,2	1,0	0,8	0,1	0,5
HCO ₃ ⁻	—/—/—	200,4	26,7	67,3	30,2	8,6	6,6	12,2	2,7	4,4
Cl ⁻	—/—/—	5,0	0,8	3,0	4,6	0,7	2,7	3,2	0,4	2,4
SO ₄ ²⁻	—/—/—	2,5	0,7	0,8	8,8	1,3	2,3	3,0	0,6	0,7
NO ₃ ⁻	—/—/—	1,47	0,30	0,51	1,05	0,22	0,24	1,23	0,17	0,33
NO ₂ ⁻	—/—/—	0,33	0,27	0,01	0,04	0,01	0,01	0,05	0,01	0,01
NH ₄ ⁺	—/—/—	3,27	0,43	1,52	3,12	0,47	1,31	3,35	0,36	1,42
F ⁻	—/—/—	0,15	0,05	0,06	0,08	0,02	0,04	0,05	0,01	0,03
Si	—/—/—	6,13	0,61	4,99	4,56	0,61	3,46	3,64	0,33	2,84
P	—/—/—	1,836	0,569	0,941	0,140	0,042	0,084	0,032	0,009	0,021
Fe	—/—/—	8,250	3,145	2,454	2,589	0,647	1,467	1,725	0,121	1,353
Al	мкг/дм ³ mkg/dm ³	106,0	29,6	26,0	511,8	170,0	124,1	470,7	63,0	230,2
Mn	то же the same	1171,6	498,4	278,1	182,5	49,5	104,9	102,2	12,0	88,3
Cu	—/—/—	3,0	1,0	0,9	21,2	10,4	2,6	3,6	0,8	1,3
Zn	—/—/—	28,6	5,4	14,9	33,4	8,2	12,0	30,8	5,6	13,1
Cd	—/—/—	0,15	0,07	0,02	0,91	0,40	0,04	0,07	0,03	0,01
Pb	—/—/—	2,15	0,50	0,56	3,74	1,24	0,58	2,12	0,92	0,29
La	—/—/—	0,213	0,102	0,042	0,436	0,170	0,195	0,111	0,023	0,091
Ce	—/—/—	0,451	0,220	0,091	0,920	0,374	0,422	0,247	0,040	0,214
Sm	—/—/—	0,054	0,023	0,009	0,102	0,038	0,054	0,030	0,005	0,026
Eu	—/—/—	0,045	0,013	0,029	0,027	0,010	0,012	0,006	0,001	0,004
ПО/PO	мгО/дм ³ mgO/dm ³	61,64	8,85	35,70	82,24	6,78	75,23	84,30	4,66	74,91
БО/DO	мгО/дм ³ mgO/dm ³	255,42	71,21	119,23	272,55	65,14	171,00	193,47	17,14	160,95
ФК/FA	мг/дм ³ mg/dm ³	116,35	37,44	75,11	121,32	17,64	100,82	145,92	9,44	144,30
ГК/HA	то же the same	64,75	34,12	12,57	42,93	14,04	23,06	67,82	20,55	29,41
Нефтепродукты Petroleum product	—/—/—	0,233	0,073	0,043	0,108	0,054	0,013	0,303	0,095	0,050

Примечание: ФК и ГК – фульво- и гуминовые кислоты; прочие обозначения – в примечаниях к табл. 1.

Note: FA and HA are fulvic and humic acids; other designations are in the notes to Table 1.

Для получения более детальных количественных оценок антропогенного влияния на болотные экосистемы был проведен анализ изменения содержаний исследуемых веществ по глубине торфяной залежи в кислотных вытяжках как на «фоновых», так и на загрязненных участках болот (рис. 2). В результате выявлено, во-первых, существенно неоднородное распределение содержаний многих веществ в «фоновом» состоянии, связанное с наличием геохимических барьеров примерно на границе перехода от деятельного к инертному горизонту, а также вблизи минерального дна, что подтверждается и различиями состава минеральных включений в торфа [25, 39]. Во-вторых, на участке Обского болота наблюдается существенное снижение концентраций

Na и Cl на глубинах 1–2 м даже в условиях многолетнего сброса сточных вод (рис. 2). В-третьих, по данным о химическом составе болотных вод в деятельном горизонте и кислотных вытяжек из торфов в слое 0,00–0,25 м методом общего понижающего градиента были определены значения параметров модели (5)–(7): для Na⁺ $Kr_{sim}=0,004$ (12); $S_{m0}=7036,087$; $k(pH)=-1,246$; $k_s=0,008$; $k_m=0,158$; $k_{p1}=0,771$; для Cl⁻ $Kr_{sim}=0,039$ (12); $S_{m0}=35145,871$; $k(pH)=-1,732$; $k_s=0,022$; $k_m=0,368$; $k_{p1}=0,631$. По полученным данным рассчитано распределение концентраций Na⁺ и Cl⁻ по глубине, согласующееся с результатами измерений в кислотных вытяжках из торфов, – антропогенное влияние в общих чертах приурочено к верхнему слою до 1–2 м (рис. 3).

В-четвертых, на поверхности низинного Обско-го болота влияние многолетних сбросов сточных вод может сказываться на участках более 500 м, хотя обычно в пределах 100–200 м наблюдается существенное снижение минерализации и содер-

жаний отдельных веществ (рис. 4). Еще меньше зона влияния шламового амбара на верховое болото на прилегающей территории (рис. 4). Но в данном случае, как мы полагаем, большое значение имеет качество гидроизоляции амбара.

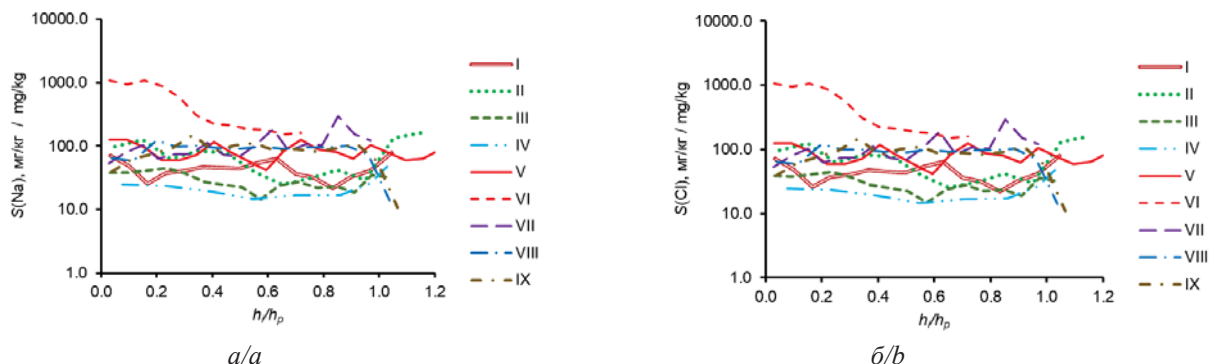


Рис. 2. Изменение концентраций Na (a) и Cl (b) в кислотных вытяжках из торфов таежной зоны Западной Сибири в зависимости от относительной глубины h_i/h_p ; условные обозначения: h_i – средняя глубина интервал опробования; h_p – глубина отложений торфа; при опробовании органо-минеральных отложений и минеральных грунтов ($h_i/h_p > 1$); объекты: I – верховой участок Васюганского болота (грядово-мочажинный комплекс, гряда; 09.11.2018 г.); II – верховой участок Васюганского болота (сосново-сфагново-кустарничковое болото – «рям»; 21.03.2017 г.); III – верховой участок Васюганского болота («рям»; 09.11.2018 г.); IV – верховой участок Васюганского болота; 09.11.2018 г.); V – низинное Обское болото («фоновый» участок у с. Нащечково; 26.11.2018 г.); VI – низинное Обское болото (загрязненный участок у с. Мельниково; 26.11.2018 г.); переходное Тимирязевское болото (25.11.2019 г.); VII – центр болота; VIII – между центром и окраиной; IX – край болота с элементами евтрофной растительности

Fig. 2. Changes in Na (a) and Cl (b) concentrations in acidic extracts from peat in the taiga zone of Western Siberia depending on the relative depth h_i/h_p ; legend: h_i is the average depth of the sampling interval; h_p is the depth of peat deposits; when sampling organo-mineral deposits and mineral soils ($h_i/h_p > 1$); objects: I is the upland area of the Vasyugan bog (ridge-hollow complex, ridge; 09.11.2018); II is the upland area of the Vasyugan bog (pine-sphagnum-shrub bog is "ryam"; 21.03.2017); III is the high-moor-peat bog area of the Vasyugan bog ("ryam"; 09.11.2018); IV is the high-moor peat bog area of the Vasyugan bog; 09.11.2018); V is the low-moor peat Obskoe fen (the "background" area near the village of Nashchekovo; 26.11.2018); VI is the low-moor peat the Obskoe fen (polluted area near the village of Melnikovo; 26.11.2018); transitional Timiryazevskoe swamp (25.11.2019); VII is the center of the swamp; VIII is the area between the center and the outskirts; IX is the edge of the swamp with elements of eutrophic vegetation

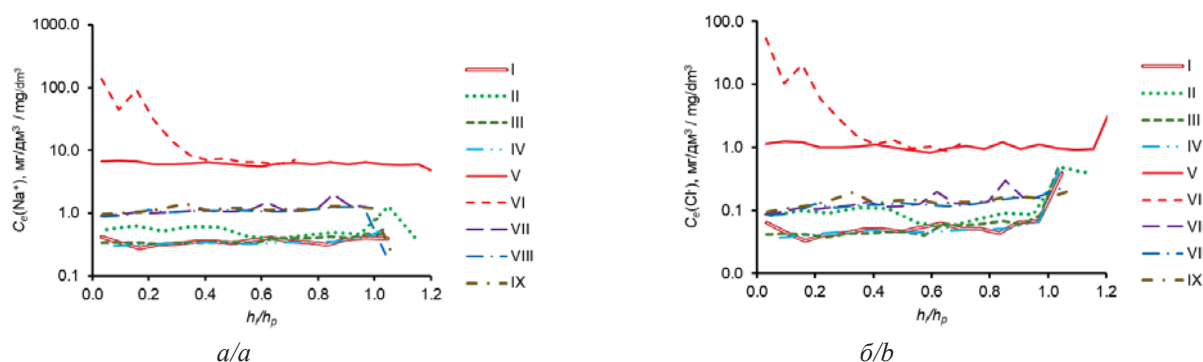


Рис. 3. Изменение концентраций Na (a) и Cl (b) в кислотных вытяжках из торфов таежной зоны Западной Сибири в зависимости от относительной глубины h_i/h_p (h_i – средняя глубина интервал опробования; h_p – глубина отложений торфа; при опробовании органо-минеральных отложений и минеральных грунтов $h_i/h_p > 1$)

Fig. 3. Changes in Na (a) and Cl (b) concentrations in acidic extracts from peat in the taiga zone of Western Siberia depending on the relative depth h_i/h_p (h_i is the average depth of the sampling interval; h_p is the depth of peat deposits; when sampling organomineral deposits and mineral soils $h_i/h_p > 1$)

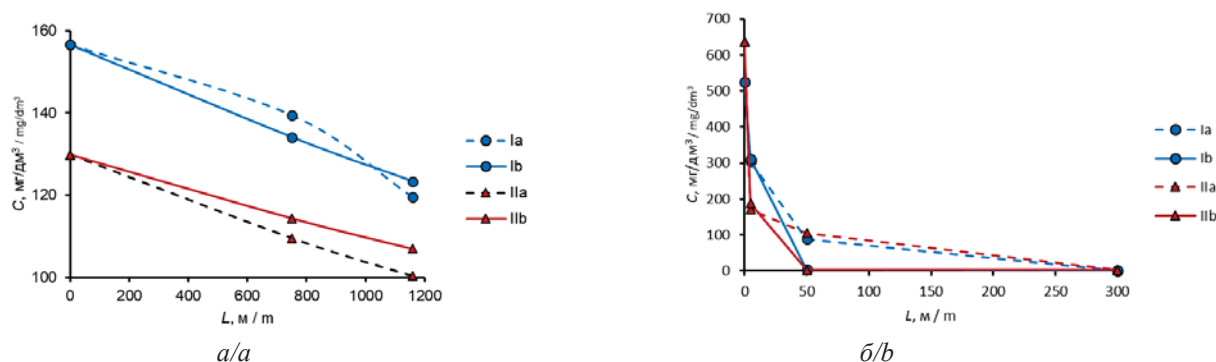


Рис. 4. Изменение измеренных и расчетных концентраций ионов Na^+ и Cl^- в водах (деятельный горизонт) низинного Обского болота (а) на участке сброса хозяйственно-бытовых стоков с. Мельниково (центр Шегарского административного района Томского района; 09.11.2018; исходные данные о химическом составе вод и торфов опубликованы в [14]; содержания Na^+ и Cl^- рассчитаны по зависимости от удельной электропроводности) и верхового болота в районе размещения шламового амбара на Западно-Моисеевском нефтяном месторождении (б) в водосборе р. Васюган (14.08.2003 г.); условные обозначения: Ia и Ib – измеренные и рассчитанные (8), (9) концентрации Na^+ ; IIa и IIb – измеренные и рассчитанные (8), (9) концентрации Cl^- ; C – концентрация; L – расстояние от источника загрязнения: а) выпуска сточных вод; б) шламового амбара

Fig. 4. Changes in measured and calculated concentrations of Na^+ and Cl^- ions in waters (active horizon) of the low-moor peat Obskoe fen (a) at the discharge site of domestic wastewater in the village of Melnikovo (the center of the Shegarsky administrative district of Tomsk region; 09.11.2018; the initial data on the chemical composition of waters and peat were published in [14]; Na^+ and Cl^- contents were calculated based on the dependence on specific electrical conductivity) and the raised bog in the area of the sludge pit at the Zapadno-Moiseevskoe oil field (b) in the catchment area of the Vasyugan river (14.08.2003 g.); legend: Ia and Ib are the measured and calculated (8), (9) Na^+ concentrations; IIa and IIb are the measured and calculated (8), (9) Cl^- concentrations; C is the concentration; L is the distance from the source of pollution: a) wastewater outlet; b) sludge pit

В-пятых, используя условие (11) были рассчитаны допустимые концентрации в сточных водах (фильтрате из шламового амбара), в пределах которых статистически значимые изменения в составе болотных вод с уровнем значимости 5 % будут отсутствовать: а) для низинного Обского болота $C_{eq}(\text{Na}^+) = 10,1 \text{ мг/дм}^3$; $C_{lim}(\text{Na}^+) = 21,5 \text{ мг/дм}^3$; $C_{eq}(\text{Cl}^-) = 2,4 \text{ мг/дм}^3$; $C_{lim}(\text{Cl}^-) = 42,7 \text{ мг/дм}^3$; б) для верхового болота вблизи шламового амбара на Западно-Моисеевском месторождении $C_{eq}(\text{Na}^+) = 0,7 \text{ мг/дм}^3$; $C_{lim}(\text{Na}^+) = 12,2 \text{ мг/дм}^3$; $C_{eq}(\text{Cl}^-) = 1,8 \text{ мг/дм}^3$; $C_{lim}(\text{Cl}^-) = 91,0 \text{ мг/дм}^3$ (условно равновесные концентрации приняты как средние геометрические для «фонового» участка Обского болота у с. Нащекново и для верховых участков Васюганского болота, соответственно).

Заключение

На основе анализа многолетних исследований болот в таежной зоне Западной Сибири оценены средние значения геохимических показателей болотных вод и распределение химических элементов в кислотных вытяжках из торфов. На этой основе предложена методика оценки антропогенного влияния на болота в результате сброса сточных вод и геомиграции на участках размещения объектов нефтегазового комплекса. С использованием этой

методики показано, что состояние изученных болот отличается от исходного, но эти изменения в основном ограничены по вертикали верхним слоем торфяной залежи до 1–2 м. По горизонтали влияние многолетнего сброса хозяйственно-бытовых стоков отражается на составе болотных вод деятельного горизонта на участках в основном до 500 м, на нефтяных месторождениях в отсутствие аварийных ситуаций – обычно не более 100–200 м. В целом значения допустимых концентраций C_{lim} по уравнению (11) можно оценивать как «относительно безопасный» уровень воздействия на болотные экосистемы, при котором не ожидается вторичного загрязнения болотных вод.

С учетом закономерностей формирования состава болотных вод и торфов, отраженных в общих чертах в модели (2)–(9), при проведении рекультивации целесообразно учитывать тип торфяной залежи и минимизировать внесение удобрений на нарушенные участки верховых болот с учетом вышеуказанных предложений [14, 15, 52, 63, 64]. По мнению авторов, игнорирование особенностей верховых болот может привести к возникновению достаточно устойчивых природно-техногенных болотных систем со свойствами, более характерными для низинных, а не для верховых болот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 19179-73. Гидрология суши. Термины и определения. – М.: Госстандарт СССР, 1988. – 47 с.
2. ГОСТ 21123-85. Торф. Термины и определения. Дата введения 01.07.1986 г. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 85 с.
3. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение / О.Л. Лисс, Л.И. Абрамова, Н.А. Аветов, Н.А. Березина, Л.И. Инишева, Т.В. Курнишкова, З.А. Слука, Т.Ю. Толпышева, Н.К. Шведчикова / под ред. В.Б. Куваева. – Тула: Гриф и К°, 2001. – 584 с.
4. Инишева Л.И. Биосферные аспекты болотного почвообразования // Жизнь Земли. – 2023. – Т. 45. – № 3. – С. 355–362.
5. Основные гидрологические характеристики. Т. 15. Алтай, Западная Сибирь и Северный Казахстан. Вып. 1. Верхняя и Средняя Обь. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 488 с.
6. Торфяные ресурсы Томского района. Справочник по состоянию изученности на 01.01.1998 г. – Новосибирск: СНИИГТИМС, 1998. – 405 с.
7. Карта торфяных месторождений Западной Сибири. Масштаб 1:1000000: объяснительная записка / под ред. Р.Г. Матухина. – Новосибирск: Изд-во СО РАН: Филиал «Гео», 2000. – 33 с.
8. Eurasian mires of the Southern Taiga Belt: modern features and response to Holocene palaeoclimate / T. Minayeva, W. Bleuten, A. Sirin, E.D. Lapshina // Wetlands and Natural Resource Management. Ecological Studies / Eds. J.T.A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, D.F. Whigham. – Berlin: Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. – Vol. 190 – P. 315–341.
9. Great Vasyugan mire: how the world's largest peatland helps addressing the world's largest problems / S.N. Kirpotin, F. Tanneberger, H. Joosten, I.V. Volkov // Ambio. – 2021. – Vol. 50. – № 11. – P. 2038–2049. DOI: 10.1007/s13280-021-01520-2.
10. Охрана окружающей среды в территориальном Западно-Сибирском комплексе / В.А. Шишов, В.Ю. Шеметов, В.И. Рябенко, В.П. Парфенов. – М.: ВНИИОЭНГ, 1988. – 50 с.
11. Shotykh W. Review of the inorganic geochemistry of peats and peatland waters // Earth-Science Reviews. – 1988. – № 25. – P. 95–176. DOI: 10.1016/0012-8252(88)90067-0.
12. Солнцева Н.П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. – М.: Изд-во МГУ, 1998. – 376 с.
13. Ecosystem recovery and natural degradation of spilled crude oil in peat bog ecosystems of West Siberia / W. Bleuten, E. Lapshina, W. Ivens, V. Shinkarenko, E. Wiersma // International Peat Journal. – 1999. – № 9. – P. 73–82.
14. Влияние шламовых амбаров на геохимическое состояние болотных экосистем в бассейне реки Васюган / В.А. Базанов, О.Г. Савичев, Д.В. Волостнов, Б.А. Егоров, А.О. Крутовский, Е.Г. Языков // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 2. – С. 72–75.
15. Льготин В.А., Савичев О.Г., Нигороженко В.Я. Состояние поверхностных водных объектов, водохозяйственных систем и сооружений на территории Томского района в 2000–2005 гг. – Томск: ОАО «Томскгеомониторинг», «АГРАФ-ПРЕСС», 2006. – 88 с.
16. Hydrological landscape settings of base-rich fen mires and fen meadows: an overview / A.P. Grootjans, E.B. Adema, W. Bleuten, H. Joosten, M. Madaras, M. Janáková // Applied Vegetation Science. – 2006. – № 9. – P. 175–184.
17. Global wetlands: potential distribution, wetland loss, and status / S. Hu, Zh. Niu, Y. Chen, L. Li, H. Zhang // Science of the Total Environment. – 2017. – Vol. 586. – P. 319–327. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.001.
18. Состояние геологической среды (недр) территории Сибирского федерального округа в 2021 г. Информационный бюллетень, выпуск 18. – Томск: Филиал «Сибирский региональный центр ГМСН», 2022. – 204 с.
19. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году. Государственный доклад. – М.: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, 2023. – 686 с.
20. Водный кадастр. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество. Ежегодное издание. 2022 год. – СПб: Росгидромет, 2023. – 153 с.
21. Li X. Application of artificial wetlands in water pollution // Highlights in Science, Engineering and Technology. – 2023. – Vol. 73. – P. 471–477. DOI: <https://doi.org/10.54097/hset.v73i.14057>
22. Moskovchenko D.V., Pozhitkov R.Yu., Tigeev A.A. Assessment of the concentration of metals and metalloids in the snow cover at oil production sites in the middle Ob region // Water Resources. – 2023. – Vol. 50. – № S1. – P. S57–S67. DOI: 10.1134/S009780782370032x.
23. Bradshaw R.H.M., Sykes M.T. Ecosystem dynamics. From the past to the future. – Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons, Ltd., 2014. – 321 p.
24. Условия трансформации коммунально-бытовых сточных вод в болотных экосистемах (на примере Обского болота, Западная Сибирь) / И.С. Иванова, О.Г. Савичев, Е.А. Солдатов, Н.Г. Наливайко, Д.С. Корнеев, Н.В. Гусева, Н.А. Смирнова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 3. – С. 39–51. DOI: 10.18799/24131830/2020/3/2530.
25. Mineralogical and geochemical features of peat deposit of eutrophic the Obskoye fen in anthropogenous conditions (the Western Siberia) / O.G. Savichev, M.A. Rudmin, A.K. Mazurov, N.G. Nalivaiko, V.I. Sergienko, I.P. Semiletov // Doklady Earth Sciences. – 2020. – Vol. 492. – P. 1. – P. 320–322. DOI: 10.1134/S1028334X20050219.
26. Геоэкологическая оценка современного состояния верховых болот (рямов) барабинской лесостепи в условиях антропогенного воздействия / Г.А. Леонова, А.Е. Мальцев, Ю.И. Прейс, В.А. Бобров // Геосферные исследования. – 2022. – № 4. – С. 76–95. DOI: 10.17223/25421379/25/5
27. Лепихин А.П. К совершенствованию технологии регламентации антропогенных нагрузок на водные объекты // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2022. – № 4. – С. 100–102.
28. Болгов М.В. О проблемах и направлениях стратегического развития водного хозяйства России // Водные ресурсы в условиях глобальных вызовов: экологические проблемы, управление, мониторинг. Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. В 2-х т. – Новочеркасск, 2023. – С. 238–244.
29. Danilov-Danilyan V.I., Klyuev N.N., Kotlyakov V.M. Russia in the global natural and ecological space // Regional Research of Russia. – 2023. – Vol. 13. – № 1. – P. 34–57. DOI: 10.1134/S2079970522700472.

30. Методика разработки нормативов допустимых сбросов загрязняющих веществ в водные объекты для водопользователей (с изменениями на 18 мая 2022 года). – М.: МПР РФ, 2022. – 46 с.
31. Водный кодекс Российской Федерации (с изменениями на 4 августа 2023 года) (редакция, действующая с 1 сентября 2023 года). Кодекс РФ от 03.06.2006 N 74-ФЗ. – М.: Кремль, 2023. – 52 с.
32. Lerman A. Geochemical processes water and sediment environments. – New York: Wiley – Inter-science Public, 1979. – 481 p.
33. Jacob A. Modelling solute transport using the double porous medium approach // *Modelling in Aquatic Chemistry* / Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech. – Paris, France: OECD, Nuclear Energy Agency, 1997. – P. 525–576.
34. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швеи В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты / отв. ред Н.П. Лавёров. – М.: Наука, 2004. – 677 с.
35. Loucks D.P., Van Beek E. Water resources systems planning and management. An introduction to methods, models and applications. – Turin: UNESCO Publ., printed by Ages Arti Grafiche, 2005. – 679 p.
36. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода–порода: в 5 т. Т. 2. Система вода–порода в условиях зоны гипергенеза / С.Л. Шварцев, Б.Н. Рыженко, В.А. Алексеев, Е.М. Дутова, И.А. Кондратьева, Ю.Г. Копылова, О.Е. Лепокурова / отв. ред. Б.Н. Рыженко. – Новосибирск: СО РАН, 2007. – 389 с.
37. Прогноз изменения макрокомпонентного состава болотных вод при добыче железных руд в Томского района / О.Г. Савичев, А.К. Мазуров, Н.В. Гусева, В.А. Домаренко, А.А. Хвощевская // *География и природные ресурсы*. – 2016. – № 1. – С. 94–102.
38. Mechanisms of accumulation of chemical elements in a peat deposit in the eastern part of Vasyugan Swamp (West Siberia) / O.G. Savichev, A.K. Mazurov, M.A. Rudmin, N.E. Shakhova, V.I. Sergienko, I.P. Semiletov // *Doklady Earth Sciences*. – 2019. – Vol. 486. – Pt. 1. – P. 568–570. DOI: 10.1134/S1028334X19050258.
39. Geochemical barriers in oligotrophic peat bog (Western Siberia) / O. Savichev, E. Soldatova, M. Rudmin, A. Mazurov // *Applied Geochemistry*. – 2020. – Vol. 113. – 104519. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.104519.
40. Савичев О.Г., Ян Х., Чжоу Д. Гидрогеодинамические и гидрогеохимические условия самоочищения вод Обского болота (Западная Сибирь) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 4. – С. 115–125. DOI: 10.18799/24131830/2022/4/3656.
41. Comparative Analysis of the Chemical Composition of Surface and Groundwater in the Poyang Lake Catchment Area (China) / D. Zhou, H. Yang, O.G. Savichev, K. Jin, Y. Wu, A.A. Khvashchevskaya // *Geography and Natural Resources*. – 2024. – Vol. 45. – № 1. – P. 101–108. DOI: 10.1134/S187537282470015X.
42. Иванов К.Е. Водообмен в болотных ландшафтах. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 280 с.
43. Требования к производству и результатам многоцелевого геохимического картирования масштаба 1:200000 / отв. ред. Э.К. Буренков. – М.: ИМГРЭ, 2002. – 92 с.
44. Чжоу Дань. Условия самоочищения и допустимое воздействие на грунтовые и поверхностные воды (на примере водосбора озера Поян КНР и Томского Приобья РФ): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2023. – 26 с.
45. Ян Хэн. Особенности взаимодействия подземных и болотных вод в гумидных условиях умеренного и субтропического климатов (на примере объектов Западной Сибири России и Восточного Китая): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2023. – 26 с.
46. Veretennikova E.E. Lead in the natural peat cores of ridge-hollow complex in the taiga zone of West Siberia // *Ecological Engineering*. – 2015. – Vol. 80. – P. 100–107.
47. Modes of occurrence of rare earth elements in peat from Western Siberia / S.I. Arbuzov, S.G. Maslov, R.B. Finkelman, A.M. Mezhibor, S.S. Ilenok, M.G. Blokhin, E.V. Peregudina // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2017. – Vol. 10. – P. 1–22. URL: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.10.012> (дата обращения 12.10.2017).
48. Geochemical features of peat deposits at oligotrophic bogs in the southern taiga subzone of West Siberia / E.E. Veretennikova, I.V. Kuryina, E.A. Dyukarev, E.A. Golovatskaya, S.V. Smirnov // *Geochemistry International*. – 2021. – Vol. 59. – № 6. – P. 618–631. DOI: 10.1134/S0016702921050098.
49. Biogeochemistry of Holocene peatlands in the Baraba forest-steppe (southern West Siberia) / G.A. Leonova, A.E. Maltsev, Yu.I. Preis, L.V. Miroshnichenko // *Applied Geochemistry*. – 2020. – Vol. 124. – 104811. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104811.
50. Геохимия торфяных болот таежной зоны Западной Сибири / В.С. Архипов, С.Г. Маслов, С.И. Арбузов, А.Ю. Иванов / под ред. С.И. Арбузова. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2022. – 210 с.
51. Маслов С.Г., Инишева Л.И., Порохина Е.В. Состав органического вещества и микроэлементов сфагновых торфов северной части месторождения Васюганское и направление их использования // *Химия растительного сырья*. – 2023. – № 2. – С. 311–318. DOI: 10.14258/jcrpm.20230211764.
52. Савичев О.Г. Геохимические показатели болотных вод в таежной зоне Западной Сибири // *Известия РАН. Серия географическая*. – 2015. – № 4. – С. 47–57.
53. ГОСТ 17644-83. Торф. Методы отбора проб из залежи и обработки их для лабораторных испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 12 с.
54. Weight W.D. Hydrogeology field manual. 2nd ed. – USA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. – 751 p.
55. Manual on stream gauging. Vol. I. Fieldwork. WMO. No. 1044. – Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2010. – 252 p.
56. Альбом аэрофотоснимков растительного покрова торфяных месторождений центральной части Западной Сибири. – М.: Геолторфразведка, 1973. – 83 с.
57. Емельянова Т.Я., Крамаренко В.В. Характеристики фильтрационных свойств торфов Томского района // *Обской вестник*. – 2001. – № 1. – С. 36–39.
58. Научно-исследовательский полигон «Васюганье». Программа научной экскурсии / Л.И. Инишева, Т.В. Дементьева, Е.А. Головацкая, Е.В. Порохина. – Томск: ЦНТИ, 2003. – 88 с.

59. Vegetation characteristics and eco-hydrological processes in a pristine mire in the Ob River valley (Western Siberia) / A.M. Schipper, R. Zeefat, F. Tanneberger, J.P. van Zuidam, W. Hahne, S.A. Schep, S. Loos, W. Bleuten, H. Joosten, E.D. Lapshina, M.J. Wassen // *Plant Ecology*. – 2007. – Vol. 193. – P. 131–145. DOI: 10.1007/s11258-006-9253-x.
60. ГОСТ 27065-86. Качество вод. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 9 с.
61. Алёкин О.А. Основы гидрохимии. – Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1970. – 444 с.
62. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the Earth // *Geochemistry International*. – 2008. – Vol. 46. – № 13. – P. 1285–1398.
63. Upenieks E.M., Rudusāne A. Afforestation as a type of peatland recultivation and assessment of its affecting factors in the reduction of GHG emissions // *Rural development*. – 2022. – Vol. 2021. – № 1. – P. 295–300. DOI: <https://doi.org/10.15544/RD.2021.052>
64. Meshram V.M., Kumar B., Dahale P.P. Natural way of treatment of domestic waste water by using anaerobic unit and engineered wetlands with phytoremediation // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2023. – Vol. 1193. – № 1. – P. 012005. DOI 10.1088/1755-1315/1193/1/012005.

Информация об авторах

Олег Геннадьевич Савичев, доктор географических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. osavichev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9561-953X>
Елена Юрьевна Пасечник, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. paseyu@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2207-9891>

Поступила в редакцию: 12.08.2024

Поступила после рецензирования: 27.09.2024

Принята к публикации: 01.10.2024

REFERENCES

1. *SS 19179-73. Land hydrology. Terms and definitions*. Moscow, Gosstandart of the USSR Publ., 1988. 47 p. (In Russ.)
2. *SS 21123-85. Peat. Terms and definitions*. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1985. 85 p. (In Russ.)
3. Liss O.L., Abramova L.I., Avetov N.A. *Bog of Western Siberia and their conservation value*. Tula, Grif i K° Publ., 2001. 584 p. (In Russ.)
4. Inisheva L.I. Biospheric aspects of bog soil formation. *Life of the Earth*, 2023, vol. 45, no. 3, pp. 355–362.
5. *Basic hydrological characteristics. Vol. 15. Altai, Western Siberia and Northern Kazakhstan. Iss. 1. Upper and Middle Ob*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1979. 488 p. (In Russ.)
6. *Peat resources of the Tomsk region. A handbook on the state of knowledge at 01.01.1998*. Novosibirsk, SNIIGGIMS Publ., 1998. 405 p. (In Russ.)
7. *Map of peat deposits in Western Siberia. Scale 1:1000000: explanatory note*. Ed. by R.G. Matukhin. Novosibirsk, SB RAS Publ. house, Branch «Geo», 2000. 33 p. (In Russ.)
8. Minayeva T., Bleuten W., Sirin A., Lapshina E.D. Eurasian mires of the Southern Taiga Belt: modern features and response to Holocene palaeoclimate. *Wetlands and Natural Resource Management. Ecological Studies*. Eds. J.T.A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, D.F. Whigham. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2006. Vol. 190, pp. 315–341.
9. Kirpotin S.N., Tanneberger F., Joosten H., Volkov I.V. Great Vasyugan mire: how the world's largest peatland helps addressing the world's largest problems. *Ambio*, 2021, vol. 50, no. 11, pp. 2038–2049. DOI: 10.1007/s13280-021-01520-2.
10. Shishov V.A., Shemetov V.Yu., Ryabchenko V.I., Parfenov V.P. *Environmental protection in the territorial West Siberian complex*. Moscow, VNIIOENG Publ., 1988. 50 p. (In Russ.)
11. Shotyk W. Review of the inorganic geochemistry of peats and peatland waters. *Earth-Science Reviews*, 1988, no. 25, pp. 95–176. DOI: 10.1016/0012-8252(88)90067-0.
12. Solntseva N.P. *Oil mining and geochemical transformation of landscapes*. Moscow, Moscow State University Press, 1998. 376 p. (In Russ.)
13. Bleuten W., Lapshina E., Ivens W., Shinkarenko V., Wiersma E. Ecosystem recovery and natural degradation of spilled crude oil in peat bog ecosystems of West Siberia. *International Peat Journal*, 1999, no. 9, pp. 73–82.
14. Bazanov V.A., Savichev O.G., Volostnov D.V., Egorov B.A., Krutovsky A.O., Yazikov E.G. The influence of sludge pits on the geochemical state of marsh ecosystems in the Vasyugan River basin. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2004, vol. 307, no. 2, pp. 72–75. (In Russ.)
15. L'gotin V.A., Savichev O.G., *The state of surface water bodies, water management systems and structures in the territory of Tomsk region in 2000–2005*. Tomsk, "Tomskgeomonitoring", "AGRAF-PRESS" Publ., 2006. 88 p. (In Russ.)
16. Grootjans A.P., Adema E.B., Bleuten, W., Joosten H., Madaras M., Janáková M. Hydrological landscape settings of base-rich fen mires and fen meadows: an overview. *Applied Vegetation Science*, 2006, vol. 9, pp. 175–184.
17. Hu S., Niu Zh., Chen Y., Li L., Zhang H. Global wetlands: potential distribution, wetland loss, and status. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 586, pp. 319–327. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.001.
18. *Condition of the geological environment (subsoil) in the territory of Siberian Federal District in 2021. Informational bulletin*. Vol. 18. Tomsk, Filial «Sibirskiy regionalny tsentr GMSN», FGBU «Gidrospektogeologiya» Publ., 2022. 204 p. (In Russ.)

19. *On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2022. State report*. Moscow, Ministry of Natural Resources of Russia; Lomonosov Moscow State University, 2023. 686 p. (In Russ.)
20. *Water cadastre. Surface and groundwater resources, their use and quality*. 2022. St. Petersburg, Roshydromet Publ., 2023. 153 p. (In Russ.)
21. Li X. Application of artificial wetlands in water pollution. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 2023, vol. 73, pp. 471–477. DOI: 10.54097/hset.v73i.14057.
22. Moskovchenko D.V., Pozhitkov R.Yu., Tigeev A.A. Assessment of the concentration of metals and metalloids in the snow cover at oil production sites in the middle Ob region. *Water Resources*, 2023, vol. 50, no. 1, pp. 57–67. DOI: 10.1134/s009780782370032x.
23. Bradshaw R.H.M., Sykes M.T. *Ecosystem Dynamics. From the past to the future*. Chichester, West Sussex, UK, John Wiley & Sons, Ltd., 2014. 321 p.
24. Ivanova I.S., Savichev O.G., Soldatova E.A., Nalivaiko N.G., Korneev D.S., Guseva N.V., Smirnova N.A. Conditions of transformation of municipal wastewater in bog ecosystems (on the example of Obskoe bog, Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 3, pp. 39–51. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2020/3/2530.
25. Savichev O.G., Rudmin M.A., Mazurov A.K., Nalivaiko N.G., Sergienko V.I., Semiletov I.P. Mineralogical and geochemical features of peat deposit of eutrophic the Obskoye fen in anthropogenous conditions (the Western Siberia). *Doklady Earth Sciences*, 2020, vol. 492, P. 1, pp. 320–322. DOI: 10.1134/S1028334X20050219.
26. Leonova G.A., Maltsev A.E., Preis Yu.I., Bobrov V.A. Geoecological assessment of the current state of raised bogs (ryams) of the Baraba forest-steppe under anthropogenic impact. *Geospheric studies*, 2022, no. 4, pp. 76–95. (In Russ.) DOI: 10.17223/25421379/25/5.
27. Lepikhin A.P. On the issue of upgrading the anthropogenic loads regulation technique. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*, 2022, no. 4, pp. 100–102.
28. Bolgov M.V. On the problems and directions of strategic development of water management in Russia. *Water resources in the context of global challenges: environmental problems, management, monitoring. Collection of works of the All-Russian scientific and practical conference with international participation*. In 2 vol. Novocherkassk, 2023, pp. 238–244. (In Russ.)
29. Danilov-Danilyan V.I., Klyuev N.N., Kotlyakov V.M. Russia in the global natural and ecological space. *Regional Research of Russia*, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 34–57. DOI: 10.1134/S2079970522700472.
30. *Methodology for developing standards for permissible discharges of pollutants into water bodies for water users (as amended on May 18, 2022)*. Moscow, MPR RF Publ., 2022. 46 p. (In Russ.)
31. *Water Code of the Russian Federation (as amended on August 4, 2023) (version effective from September 1, 2023). Code of the Russian Federation of 03.06.2006 N 74-FZ*. Moscow, Kremlin Publ., 2023. 52 p.
32. Lerman A. *Geochemical Processes Water and Sediment Environments*. New York, Wiley – Inter-science Public, 1979. 481 p.
33. Jacob A. Modelling solute transport using the double porous medium approach. *Modelling in Aquatic Chemistry*. Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech. Paris, France, OECD, Nuclear Energy Agency, 1997. pp. 525–576.
34. Kraynov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. *Geochemistry of ground waters: theoretical, applied and environmental aspects*. Moscow, Nauka Publ., 2004. 677 p. (In Russ.)
35. Loucks D.P., Van Beek E. *Water resources systems planning and management. An introduction to methods, models and applications*. Turin, UNESCO Publ., printed by Ages Arti Grafiche, 2005. 679 p.
36. Shvartsev S.L., Ryzhenko B.N., Alekseev V.A., Dutova E.M., Kondratieva I.A., Kopylova Yu.G., Lepokurova O.E. *Geological evolution and self-organizing of water–rock system. V. 1. Water–rock system in conditions of a zone of active water exchange*. Ed. by B.N. Ryzhenko. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Science Publ. house, 2007. 389 p. (In Russ.)
37. Savichev O.G., Mazurov A.K., Guseva N.V., Domarenko V.A., Khvashchevskaya A.A. The forecast of change of macrocomponental composition of wetland waters at extraction of minerals in the Tomsk region. *Geography and natural resources*, 2016, no. 1, pp. 94–102. (In Russ.)
38. Savichev O.G., Mazurov A.K., Rudmin M.A., Shakhova N.E., Sergienko V.I., Semiletov I.P. Mechanisms of Accumulation of Chemical Elements in a Peat Deposit in the Eastern Part of Vasyugan Swamp (West Siberia). *Doklady Earth Sciences*, 2019, vol. 486, P. 1, pp. 568–570. DOI: 10.1134/S1028334X19050258.
39. Savichev O., Soldatova E., Rudmin M., Mazurov A. Geochemical barriers in oligotrophic peat bog (Western Siberia). *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 113, 104519. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.104519.
40. Savichev O.G., Yang H., Zhou D. Hydrogeodynamic and hydrogeochemical conditions of self-clearance of the Obskoe fen water (Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 4, pp. 115–125. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2022/4/3656.
41. Zhou D., Yang H., Savichev O.G., Jin K., Wu Y., Khvashchevskaya A.A. Comparative Analysis of the Chemical Composition of Surface and Groundwater in the Poyang Lake Catchment Area (China). *Geography and Natural Resources*, 2024, vol. 45, no. 1, pp. 101–108. DOI: 10.1134/S187537282470015X.
42. Ivanov K.E. *Water exchange in mire landscapes*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975. 280 p. (In Russ.)
43. *Requirements to production and results of multi-purpose geochemical mapping of scale 1:200000*. Ed. by E.K. Bkurenkov. Moscow, IMGRE Publ., 2002. 92 p. (In Russ.)
44. Zhou Dan. *Self-purification conditions and permissible impact on ground and surface waters (using the Poyang Lake catchment area of China and the Tomsk Ob region of Russia as an example)*. Cand. Diss. Abstract. Tomsk, 2023. 26 p. (In Russ.)
45. Yan Heng. *Features of the interaction of ground and marsh waters in humid conditions of temperate and subtropical climates (using Western Siberia, Russia, and Eastern China as an example)*. Cand. Diss. Abstract. Tomsk, 2023. 26 p. (In Russ.)
46. Veretennikova E.E. Lead in the natural peat cores of ridge-hollow complex in the taiga zone of West Siberia. *Ecological Engineering*, 2015, vol. 80, pp. 100–107.

47. Arbuzov S.I., Maslov S.G., Finkelman R.B., Mezhibor A.M., Ilenok S.S., Blokhin M.G., Peregudina E.V. Modes of occurrence of rare earth elements in peat from Western Siberia. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, no. 10, pp. 1–22. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.10.012> (accessed 12 October 2017).
48. Veretennikova E.E., Kuryina I.V., Dyukarev E.A., Golovatskaya E.A., Smirnov S.V. Geochemical features of peat deposits at oligotrophic bogs in the southern taiga subzone of West Siberia. *Geochemistry International*, 2021, vol. 59, no. 6, pp. 618–631. DOI: 10.1134/S0016702921050098.
49. Leonova G.A., Maltsev A.E., Preis Yu.I., Miroshnichenko L.V. Biogeochemistry of holocene peatlands in the baraba forest-steppe (southern West Siberia). *Applied Geochemistry*, 2021, vol. 124, 104811. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104811.
50. Arkhipov V.S., Maslov S.G., Arbuzov S.I., Ivanov A.Yu. Geochemistry of peat bogs in the taiga zone of Western Siberia. Ed. by S.I. Arbuzov. Novosibirsk, SB RAS Publ. House, 2022. 210 p. (In Russ.)
51. Maslov S.G., Inisheva L.I., Porokhina E.V. Composition of organic matter and microelements of sphagnum peat of the northern part of the Vasyuganskoe deposit and the direction of their use. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2023, no. 2, pp. 311–318. (In Russ.) DOI: 10.14258/jcprm.20230211764
52. Savichev O.G. Geochemical indicators of bog waters in the taiga zone of Western Siberia. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*, 2015, no. 4, pp. 47–57. (In Russ.)
53. SS 17644-83. *Peat. Methods of sampling from deposit and preparation of samples for laboratory tests*. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1983. 12 p. (In Russ.)
54. Weight W.D. *Hydrogeology field manual*. 2nd ed. USA, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. 751 p.
55. *Manual on stream gauging*. Vol. I. *Fieldwork*. WMO. No. 1044. Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization, 2010. 252 p.
56. *Album of photographs of the vegetation cover of peat deposits in the central part of Western Siberia*. Moscow, Geol'torfravzedka Publ., 1973. 83 p. (In Russ.)
57. Emelyanova T.Ya., Kramarenko V.V. Characteristics of the filtration properties of peats of the Tomsk region. *Obiskoy vestnik*, 2001, no. 1, pp. 36–39. (In Russ.)
58. Inisheva L.I., Dement'yeva T.V., Golovatskaya E.A., Porokhina E.V. *Scientific-research ground "Vasyugane". Program of scientific excursion*. Tomsk, TSNTI Publ., 2003. 88 p. (In Russ.)
59. Schipper A.M., Zeefat R., Tanneberger F., Van Zuidam J.P., Hahne W., Schep S.A., Loos S., Bleuten W., Joosten H., Lapshina E.D., Wassen M.J. Vegetation characteristics and eco-hydrological processes in a pristine mire in the Ob River valley (Western Siberia). *Plant Ecology*, 2007, vol. 193, pp. 131–145. DOI: 10.1007/s11258-006-9253-x.
60. SS 27065-86. *Quality of water. Terms and definitions*. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 2003. 9 p. (In Russ.)
61. Alekin O.A. *Bases of hydrochemistry*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1970. 444 p. (In Russ.)
62. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth. *Geochemistry International*, 2008, vol. 46, no. 13, pp. 1285–1398.
63. Upenieks E.M., Rudusāne A. Afforestation as a type of peatland recultivation and assessment of its affecting factors in the reduction of GHG emissions. *Rural development*, 2022, vol. 2021, no. 1, pp. 295–300. DOI: <https://doi.org/10.15544/RD.2021.052>.
64. Meshram V.M., Kumar B., Dahale P.P. Natural way of treatment of domestic waste water by using anaerobic unit and engineered wetlands with phytoremediation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2023, vol. 1193, no. 1, p. 012005. DOI 10.1088/1755-1315/1193/1/012005.

Information about the authors

Oleg G. Savichev, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. OSavichev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9561-953X>

Elena Yu. Pasechnik, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. paseyu@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2207-9891>

Received: 12.08.2024

Revised: 27.09.2024

Accepted: 01.10.2024