

УДК 556.531.4:550.84.094

ГИДРОГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ И ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ САМООЧИЩЕНИЯ ВОД ОБСКОГО БОЛОТА (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

Савичев Олег Геннадьевич¹,
OSavichev@mail.ru

Ян Хэн¹,
13698754927@163.com

Чжоу Дань¹,
929177582@qq.com

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. Хозяйственная деятельность на заболоченных территориях Западной Сибири в условиях изменения климата требует научного обоснования методики экологического мониторинга и природоохранных мероприятий. Один из эффективных способов такого обоснования с учетом дефицита наблюдений – математическое моделирование гидрогеодинамических и гидрогеохимических процессов в болотных экосистемах.

Цель: выявление механизмов природно-техногенного распределения концентраций Cl^- в водных вытяжках из торфов по глубине торфяной залежи.

Методы: полевой эксперимент, методы определения химического состава болотных вод и водных вытяжек из торфов и минеральных отложений, методы математического моделирования.

Результаты и выводы. Проведен эксперимент по изучению самоочищения евтрофного Обского болота на юге Томской области (выпуск на поверхность болота 50 л раствора $NaCl$ с концентрацией 20 г/дм³) и установлен характер изменения концентраций Cl^- в торфяной залежи до и после выпуска раствора. Для объяснения выявленных фактов выполнены разработка и апробация математических моделей водного и геохимического режима участка торфяного болота. В результате показано, что: 1) болотные воды образуют общий поток с подземными водами в сторону реки Оби; на границе болота возможны периодические колебания напора подземных вод; 2) в нижней части торфяной залежи на исследуемом участке сформировался локальный водоупор, препятствующий распространению веществ по торфяной залежи; 3) распределение индикатора (Cl^-) по торфяной залежи в значительной мере зависит не только от первоначальных объема и концентрации $NaCl$ и наличия водоупора, но и от характера увлажнения болота. Даны рекомендации по использованию результатов моделирования.

Ключевые слова:

Математическое моделирование, химический состав, торфяная залежь, болотные воды, Обское болото, Западная Сибирь.

Введение

Загрязнение окружающей среды – одна из ключевых проблем современности. Весьма остро она стоит в Западно-Сибирском регионе – одном из важнейших нефтегазодобывающих регионов мира, особенностью которого является очень высокая заболоченность водосборных территорий [1–4]. Такие территории характеризуются сложными инженерно-геологическими и гидрологическими условиями. В ряде случаев их наличие может способствовать отклонениям фактического состояния технических систем от проектных требований вплоть до аварийных ситуаций, связанных со сбросом в болота и на заболоченные земли нефтегазоводяной эмульсии и минерализованных вод из систем поддержания пластового давления (ППД). Причем во многих случаях наибольший вред окружающей среде наносит именно сброс минерализованных вод [5–8].

С учетом этого в Томском политехническом университете (ТПУ) в 2021 г. проведен эксперимент по изучению условий распространения в болотной среде загрязняющих веществ (раствор $NaCl$, основной индикатор – содержание Cl^-) и самоочищения евтрофной болотной экосистемы на примере Обского болота, расположенного на юго-востоке Западной Сибири, в левобережной части долины реки Обь (преимущественно – на первой надпойменной террасе), в виде

полосы длиной около 104 км и шириной 1,5–7,0 км [9]. Указанное болото характеризуется средней глубиной торфяной залежи около 3,2 м, максимальной – 6 м и распространением низинных торфов со степенью разложения 34 % и зольностью 28–29 %. Более подробная информация об Обском болоте приведена в работах [9–13]. Использование именно раствора $NaCl$ обусловлено сходством по составу с водами системы ППД и высокой миграционной способностью хлоридов, что позволяет оценить максимальные размеры зоны распространения.

18 марта 2021 г. на Обском болоте (юг Томской области) в районе с. Нашеково (Шегарский административный район Томской области) пробурено пять скважин (Н1, Н2, Н3, Н4, Н5), отобраны пробы болотных вод в деятельном горизонте торфяной залежи и торфов через 0,25 м. Четыре скважины расположены в виде вершин квадрата со стороной 100 м. В середине квадрата на поверхности болота 19.03.2021 г. (скважина Н3) выполнен выпуск 50 л раствора $NaCl$ с концентрацией 20 г/дм³ (рис. 1). Повторные бурение и отбор проб болотных вод и торфов проведены 16.10.2021 г. Работы выполнены с учетом требований и рекомендаций [14–18].

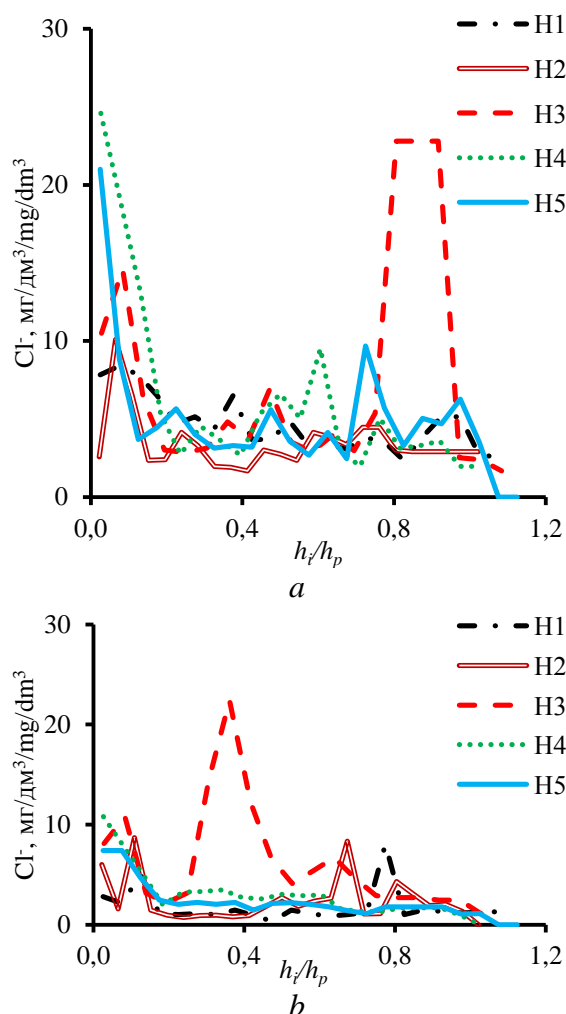
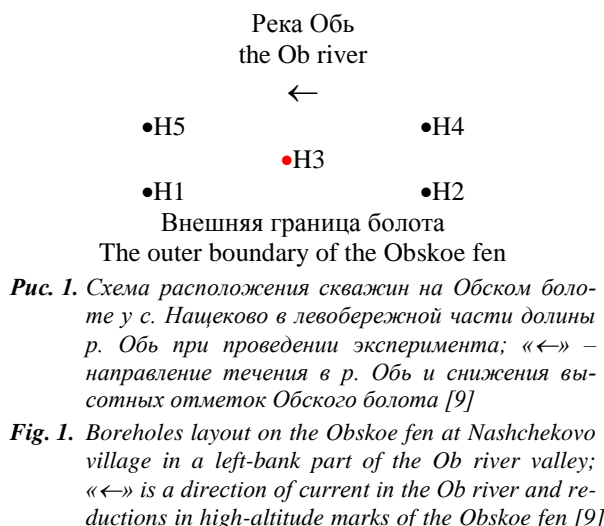


Рис. 2. Изменение концентраций Cl⁻ в водных вытяжках из торфов в скважинах H1–H5 18 марта (а) и 16 октября (б) 2021 г.; h_i/h_p – отношение средней глубины отбора пробы (по интервалу 0,25 м) к глубине торфяной залежи

Fig. 2. Change of Cl⁻ concentration in water extracts from peats in borehole from H1 to H5 on 18 March (a) and 16 October (b) 2021; h_i/h_p is the ratio of the average sampling depth (over an interval of 0,25 m) to the depth of the peat deposit

Было показано, что с 19 марта по 16 октября 2021 г. непосредственно в месте выпуска раствора NaCl в интервале глубин 1,50–2,00 м сформировались относительно повышенные концентрации Na⁺ (до 11,5 мг/дм³) и Cl⁻ (до 22,4 мг/дм³). В прочих скважинах (на удалении около 70 м от выпуска) значимые изменения значений pH, удельной электропроводности ЕС, концентраций Na⁺ и Cl⁻ в болотных водах и водных вытяжках из торфов, связанные с выпуском раствора NaCl, не выявлены, что свидетельствует о значительной способности болотной экосистемы к самоочищению. Более подробно методика и результаты эксперимента охарактеризованы в работе [9]. Ниже рассмотрены причины выявленных изменений, а точнее – повышенных концентраций Cl⁻ в нижней части торфяной залежи до выпуска раствора и локализации раствора NaCl непосредственно в месте его выпуска в интервале глубин до 2,00 м (рис. 2).

Методика исследования

Основной подход к объяснению характера изменений концентраций Cl⁻ в водных вытяжках из торфов до и после выпуска раствора NaCl заключается в подборе математической модели распределения Cl⁻ с учетом режима подземных и болотных вод. Соответственно, методика исследования одновременно является и ее результатом. Поэтому далее отметим только основные подходы к разработке модели и источники информации для оценки ее параметров.

Для описания геомиграции в подземных водах обычно используется система уравнений сохранения количества движений, неразрывности водного потока и неразрывности потока вещества, растворенного или взвешенного в потоке, с учетом равномерного или неравномерного, установившегося или неустановившегося движения, жесткого или упругого режима фильтрации и ряда допущений, составляющих содержание типизации (гидродинамического районирования с выделением однотипных районов) и схематизации (упрощения природной обстановки и факторов в пределах выделенных районов) гидрогеологических и гидрогеохимических условий [19–24].

Очевидно, что аналогичный подход может быть использован и для изучения геомиграции в торфяном болоте [10, 25], в структуре которого обычно выделяют деятельный и инертный горизонты [26, 27]. Первый (деятельный горизонт) расположен в верхней части торфяной залежи (до 0,5–1,0 м), примерно соответствует корнеобитаемому слою и характеризуется доступом кислорода, сезонным изменением уровня болотных вод и более интенсивной (по сравнению с остальной частью торфяной залежи) фильтрацией преимущественно в горизонтальном направлении. В условиях неполного водонасыщения этого слоя в меженный период обычно рассматривают влагоперенос, характеризующийся коэффициентами влагопереноса k_w в зависимости от коэффициентов фильтрации k_f (при полном насыщении) и относительной влажности θ [21], например, по формуле С.Ф. Аверьянова [28]:

$$k_w = k_f \cdot \left(\frac{\omega - \omega_0}{n - \omega_0} \right)^{3,5}, \quad (1)$$

где ω – влажность; ω_0 – связанная влага; n – пористость грунта (все в долях единицы). При этом скорость поступления влаги к горизонту болотных вод I_{fw} может быть описана уравнением (2) с учетом модели инфильтрации Грина–Эмптона [29]:

$$I_{fw} \approx k_w \cdot \left(1 + \frac{X_{ef} + X_{sw}}{h_f} \right), \quad (2)$$

где h_f – глубина залегания болотных вод, м; X_{sw} – слой сточных вод, м/сут (в расчете, что инфильтрация 50 л раствора происходит одновременно на поверхности залежи площадью примерно 1 м²); X_{ef} – эффективное атмосферное увлажнение (м/сут); расчет месячных значений X_{ef} (мм/мес) проводится по уравнениям (3)–(10):

$$X_{ef,t} = X_{r,t} + X_{sm,t} - E_{wp,t}, \quad (3)$$

$$X_{r,t} = \begin{cases} X_t, T_{atm,t} > T_{atm,l} \\ 0, T_{atm,t} \leq T_{atm,l} \end{cases}, \quad (4)$$

$$X_{sn,t} = X_t - X_{r,t}, \quad (5)$$

$$X_{sm,t} = \begin{cases} X_{S,t-1} - X_{S,t}, X_{S,t-1} - X_{S,t} \geq 0 \\ 0, X_{S,t-1} - X_{S,t} < 0 \end{cases}, \quad (6)$$

$$X_{S,t} = \begin{cases} X_{S,t-1} + X_{sn,t} - E_{cp,t} - X_{sp,t}, \\ X_{S,t-1} + X_{sn,t} - E_{cp,t} - X_{sp,t} > 0; \\ 0, X_{S,t-1} + X_{sn,t} - E_{cp,t} - X_{sp,t} \leq 0, \end{cases} \quad (7)$$

$$X_{sp,t} = k_{sp} \cdot T_{atm(>0)} \cdot M_t, \quad (8)$$

$$E_{cp,t} = k_{cp} \cdot d_{atm,t} \cdot M_t, \quad (9)$$

$$E_{wp,t} = E_{wpy} \cdot \frac{d_{atm,t}}{\sum_{T_{atm,t}>0} d_{atm,t}}, \quad (10)$$

где X_t – атмосферные осадки в месяц t , мм/мес; $X_{r,t}$ и $X_{sn,t}$ – атмосферные осадки в виде дождя и снега, соответственно, мм/мес; $T_{atm,t}$ – среднемесячная температура приземных слоев атмосферного воздуха в месяц t , °C; $T_{atm,l}$ – расчетная температура атмосферного воздуха, выше которой атмосферные осадки преимущественно в жидком состоянии (условно принято 0 °C); $X_{S,t}$ – влагозапасы в снежном покрове, мм; $X_{sp,t}$ – потенциально возможная водоотдача из снежного покрова (принята ориентировочно как потенциальная интенсивность снеготаяния, вычисленная при коэффициенте стаивания $k_{sp}=5$ мм/сут), мм/мес; $X_{sm,t}$ – расчетная водоотдача из снежного покрова, мм/мес; M_t – количество суток в месяце t ; $E_{cp,t}$ – испарение с поверхности водосбора в холодный период в месяц t (при $T_{atm,t} < 0$; расчет по формуле П.П. Кузьмина с учетом значения эмпирического коэффициента $k_{cp}=0,34$ [30]); E_{wpy} и $E_{wp,t}$ – испарение с поверхности водосбора за весь холодный период и месяц t , мм/мес; значения E_{wpy} вычислялось по разнице испарения за год и за холодный период; годовое испарение рассчитывалось по модифицированной формуле Шрайбера [31]; $d_{atm,t}$ и $\sum_{T_{atm,t}>0} d_{atm,t}$ – среднемесячный дефицит влажности атмосферного воздуха за месяц t и их сумма за теплый период, гПа. Расчетная мощность деятельного горизонта принята в размере 0,5 м с учетом уменьшения фильтрационных свойств и отложе-

ния малорастворимых соединений примерно на глубине 0,75 м [12, 13].

Второй (инертный) расположен ниже, коэффициенты фильтрации k_f резко уменьшаются с глубиной h , причем в случае низинных болот это снижение ориентировочно описывается уравнением Б.С. Маслова [32]:

$$k_{f(h)} = k_{f(0,5)} \cdot \exp(-1,3 \cdot (h - 0,5)), \quad (11)$$

где $k_f(h)$ и $k_f(0,5)$ – коэффициенты фильтрации (м/сут) на глубине h и в верхнем слое на глубине 0,5 м. Также следует отметить, что, согласно [33], в торфяной залежи верхового участка Васюганского болота отмечены два геохимических барьера – на границе деятельного горизонта и в нижней части торфяной залежи. Верхний барьер приурочен к резкому снижению скорости адвективного переноса, нижний – к практически полному отсутствию диффузионного переноса. В обоих случаях выявлено возможное взаимовлияние осаждения малорастворимых соединений и уменьшения коэффициентов фильтрации (на верхнем барьере – преимущественно гидроксиды железа, на нижнем – сульфиды и карбонаты металлов, глинистые минералы). Похожая по некоторым признакам картина ранее была выявлена и на низинном Обском болоте, но с рядом отличий – значительно большие значения минерализация и pH болотных вод, более высокая амплитуда колебаний содержания железа и окисляемости и так далее [12], что, с одной стороны, и послужило дополнительным аргументом для изучения гидрогеодинамических условий на этом объекте. С другой стороны, многими исследователями констатировался факт влияния на Обское болото подземных вод [10, 34]. Распределение торфов по залежи принято по [34] с учетом [10] и материалов собственных исследований [9, 11–13], коэффициенты фильтрации и пористость – по данным [35] с учетом типа торфа.

Для решения указанной выше системы уравнений, описывающих состояние подземных и болотных вод, в последние годы достаточно широко используются численные методы, что было сделано, например, и авторами работы [10]. Но при этом необходимо отметить отсутствие данных режимных наблюдений за уровнями подземных и болотных вод на исследуемом участке Обского болота. Принимая во внимание в целом невысокую гидрогеологическую изученность, это приводит к многовариантности выводов (о степени взаимосвязей между водными объектами) и их, скорее, качественном, а не количественном характере в случае выяснения причин зафиксированных изменений содержания СГ с 19 марта по 16 октября 2021 г.

По этой причине и с учетом данных [10, 34] нами был использован подход, в соответствии с которым: 1) подземные и болотные воды образуют единый поток от водораздела в сторону реки Обь; 2) их водный режим можно рассматривать как цепь из стационарных состояний, каждое из которых соответствует месячному интервалу; 3) структура модели разрабатывается и апробируется для элементов месячного водного баланса в среднем за многолетний период (по имеющимся многолетним данным наблюдений на

гидрогеологической скважине 63р и реке Обь у п. Победа [36]) и для периода с 18 марта по 16 октября 2021 г. с приблизительным выделением месячных интервалов (пересчет среднееголетних значений уровней подземных вод с поправкой на фактическое эффективное увлажнение); 4) внутри потока выделяются три характерных участка: L_1) суходол, прилегающий к границе Обского болота со стороны водораздела Обь–Иртыш; L_2) участок Обского болота; L_3) участок поймы реки Обь от границы Обского болота до уреза речных вод; 5) расход воды при установившемся движении в любой точке профиля оценивается по уравнениям (12), (13); 6) уровень болотных вод в месяц t на границе болота с водоразделом описывается (с учетом данных эпизодических наблюдений на исследуемом участке Обского болота) выражением (14), в точке перегиба кривой поверхности болота – (15), на границе болота с рекой Обь – (16), на участке L_1 – (17), на участке L_2 – (18), на участке L_3 – (19):

$$q_{x,t} = q_{1,t} + I_{f,t} \cdot x, \quad (12)$$

$$q_{1,t} = k_{f1} \cdot \frac{Z_{g0,t}^2 - Z_{f1,t}^2}{2 \cdot L_1} - I_{f,t} \cdot \frac{L_1}{2}, \quad (13)$$

$$Z_{f1,t} = (Z_{sf1} - \Delta Z_f) + (Z_{g0,t} - Z_{g0,a}), \quad (14)$$

$$Z_{f2,t} = (Z_{sf2} - \Delta Z_f) + X_{ef,t}, \quad (15)$$

$$Z_{f3,t} = \sqrt{Z_r^2 + \frac{2 \cdot L_3}{k_{f3}} \cdot (q_{1,t} + I_{f,t} \cdot x) + I_{f,t} \cdot \frac{L_3}{2}}, \quad (16)$$

$$Z_{1x,t} = \sqrt{Z_{g0,t}^2 - (Z_{g0,t}^2 - Z_{f1,t}^2) \frac{x_1}{L_1} + \frac{I_{f,t}}{k_{f1}} (L_1 - x_1) x_1}, \quad (17)$$

$$Z_{2x,t} = Z_{2(x-1),t} - (q_{1,t} + I_{f,t} \cdot x) \times \frac{\Delta x}{\left(k_{fg,xa,t} m_{g,xa,t} + k_{fip,xa,t} m_{ip,xa,t} + k_{fap,xa,t} m_{ap,xa,t} \right)}, \quad (18)$$

$$Z_{3x,t} = \sqrt{Z_{f3,t}^2 - (Z_{f3,t}^2 - Z_{r,t}^2) \frac{x_3}{L_3} + \frac{I_{f,t}}{k_{f3}} (L_3 - x_3) x_3}, \quad (19)$$

где $I_{f,t}$ – скорость инфильтрации за месяц t , м/сут; для среднееголетнего периода определена в работе [13], а для периода с 18 марта по 16 октября 2021 г. – с поправкой на фактическое месячное эффективное увлажнение (если эффективное увлажнение (дождь + водоотдача из снежного покрова – испарение) в месяце t отрицательное, то проводится перераспределение из месяца с предыдущим максимальным увлажнением на месяцы с отрицательными значениями так, чтобы минимум не был меньше нуля с учетом того, что влага накапливается на поверхности и в приповерхностном слое, а потом расходуется на испарение и инфильтрацию); $q_{x,t}$ – удельный расход воды за месяц t , м³/сут; $Z_{f1,t}$, $Z_{f2,t}$, $Z_{f3,t}$ – среднемесячные уровни болотных вод в опорных точках в месяц t , м (в Балтийской системе высот); $Z_{1x,t}$, $Z_{2x,t}$, $Z_{3x,t}$ – среднемесячные уровни подземных и болотных вод между опорными точками в месяц t , м (в Балтийской системе высот); x , x_1 , x_3 – расстояние от условного начала или соответствующего участка, м; L , L_1 , L_2 , L_3 – общая длина и длина каждого из участков, м; Δx – длина приращения между расчетными точками по профилю, м.

Начало первого участка принято по условной линии, проходящей через гидрогеологическую скважину 63р у с. Мельниково параллельно реке Обь (нулевая отметка в условном поперечном профиле долины реки Обь), до отметки 1500 м (граница болота). Второй участок расположен между отметками 1500 и 4730 м, третий – между 4730 и 4800 м (4800 м – расстояние до среднееголетнего уреза реки Обь). Опорные точки на болоте соответствуют отметкам 1500 и 1686 м от условного начала. На первом участке средневзвешенный коэффициент фильтрации водоносного горизонта составляет 9,97 м/сут, на третьем – 10,6 м/сут (коэффициенты фильтрации в минеральных грунтах определены по зависимости от мощности рассматриваемого горизонта [13]). В пределах болота общий водоносный горизонт рассматривался как три взаимосвязанных (в разной степени) горизонта: 1) водоносные отложения, сложенные минеральными грунтами (средневзвешенный коэффициент фильтрации 10,72 м/сут); 2) инертный горизонт торфяной залежи (средневзвешенный коэффициент фильтрации в зависимости от типа торфов по данным [35]); 3) деятельный горизонт торфяной залежи (средневзвешенные коэффициенты фильтрации подбираются средствами MS Excel с использованием метода общего понижающего градиента) с целевой функцией в виде модификации критерия Нэша–Сатклифа [37]:

$$\frac{s}{\sigma} = \sqrt{1 - R^2} = \sqrt{\frac{\sum (y_{o,i} - y_{s,i})^2}{\sum (y_{o,i} - y_{oa})^2}}, \quad (20)$$

где R^2 – квадрат корреляционного отношения; $y_{o,i}$ и $y_{s,i}$ – измеренные и расчетные значения характеристики y ; y_{oa} – среднее арифметическое измеренных значений.

По результатам апробации изложенного выше подхода уточнялась структура моделей взаимодействия подземных и болотных вод и распространения СГ по торфяной залежи с использованием метода наименьших квадратов при условии (21) согласно [38] и метода общего понижающего градиента с целевой функцией (20) или (22):

$$|r| \geq 0,7; \frac{|r|}{\delta_r} \geq 2; \frac{|k_r|}{\delta_k} \geq 2, \quad (21)$$

$$f = \frac{100 \cdot |y_{o,i} - y_{s,i}|}{y_{o,i}}, \quad (22)$$

где r и δ_r – коэффициент корреляции и погрешность его определения; k_r и δ_k – коэффициент регрессии и погрешность его определения. Расчеты выполнены в MS Excel.

Результаты исследования и их обсуждение

Апробация модели (1)–(19) показала удовлетворительную сходимость (критерий (20) менее 0,1) с наблюдаемым состоянием Обского болота по состоянию на 18 марта и 16 октября 2021 г. в пунктах опробования торфяной залежи и в узловых точках расчетного профиля. Один из выводов, который можно сделать по результатам анализа расчетного профиля в разные месяцы гидрологического года (как в 2021 г.,

так и в среднем за многолетний период), заключается в том, что поверхность Обского болота в целом соответствует кривой депрессии подземных вод (рис. 3; термин «кривая депрессии» употребляется согласно [19, 21] для описания поверхности подземных вод на территории, дренируемой водоком). Следовательно, эволюция болотной экосистемы контролируется условиями взаимодействия подземных, речных и болотных вод.

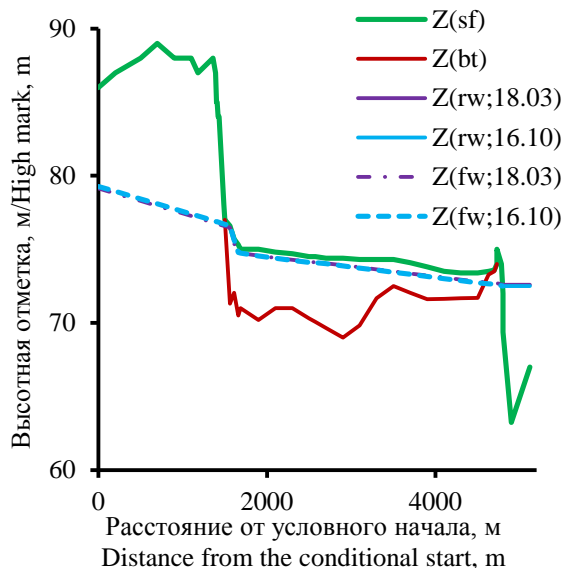


Рис. 3. Расчетный профиль Обского болота; Z(sf) – высотная отметка земной поверхности; Z(bt) – отметка дна болота; Z(rw; 18.03) и Z(rw; 16.10) – уровень воды реки Обь в створе расчетного профиля; Z(fw; 18.03) и Z(fw; 16.10) – расчетный уровень болотных вод

Fig. 3. Calculated profile of the Obskoe fen; Z(sf) is the elevation of the Earth's surface; Z(bt) is the mark of the bottom of the fen; Z(rw; 18.03) and Z(rw; 16.10) are water levels of the Ob river in the cross-section of the calculated profile; Z(fw; 18.03) and Z(fw; 16.10) are calculated levels of fen waters

Другой, не менее важный, вывод заключается в том, что на границе Обского болота с суходолом возможны разнонаправленные движения болотных вод как в сторону Оби, так и в сторону водораздела, что формально соответствует отрицательным значениям проводимости деятельного горизонта торфяной залежи. Последнее обстоятельство, в свою очередь, приводит к выводу о том, что в ряде случаев возможны колебательные изменения уровня болотных вод при решении уравнения подпертой фильтрации. Так, если принять, согласно [21, 39], что изменение удельного расхода воды описывается уравнением (23), то при переменной проводимости потока $k_{fg} \cdot m_g$ в водоносных отложениях изменение уровней воды соответствует уравнению (24). Его решением, согласно [40, 41], при комплексных значениях корней характеристического уравнения будет выражение (25) с периодом колебаний $\tau = \frac{2\pi}{\beta}$ и параметрами γ и β (26), (27):

$$\frac{dq_t}{dx} = \frac{k_{fn}}{m_n} \cdot (Z_t - Z_{fw,t}), \quad (23)$$

$$\frac{\partial^2 Z_t}{\partial x^2} + \left(\frac{1}{k_{fg} \cdot m_g} \cdot \frac{d k_{fg} \cdot m_g}{dx} \right) \frac{\partial Z_t}{\partial x} - \left(\frac{k_{fn}}{m_n \cdot k_{fg} \cdot m_g} \right) \times (Z_t - Z_{fw,t}) = 0, \quad (24)$$

$$Z_t = Z_{fw,t} + e^{-\gamma x} (Z_1 \cos(\beta x) + Z_2 \sin(\beta x)), \quad (25)$$

$$\gamma = \frac{1}{2 \cdot k_{fg} \cdot m_g} \cdot \frac{d k_{fg} \cdot m_g}{dx}, \quad (26)$$

$$\beta = \sqrt{\left(\frac{k_{fn}}{m_n \cdot k_{fg} \cdot m_g} \right) - \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{1}{k_{fg} \cdot m_g} \cdot \frac{d k_{fg} \cdot m_g}{dx} \right)^2}, \quad (27)$$

где q_t – удельный расход воды через торфяную залежь (по аналогии с относительно водонепроницаемым слоем) мощностью m_n и с коэффициентом фильтрации k_{fn} ; Z_t и $Z_{fw,t}$ – уровни подземных и болотных вод.

Уточненный профиль пограничного участка Обского болота представлен на рис. 4. Его интерпретация заключается в констатации возможности поступления подземных вод с более высокой минерализацией и содержанием СГ в разные месяцы гидрологического года и в разных частях Обского болота, что в общих чертах и подтверждается результатами гидрогеохимических наблюдений, приведенных в [9].

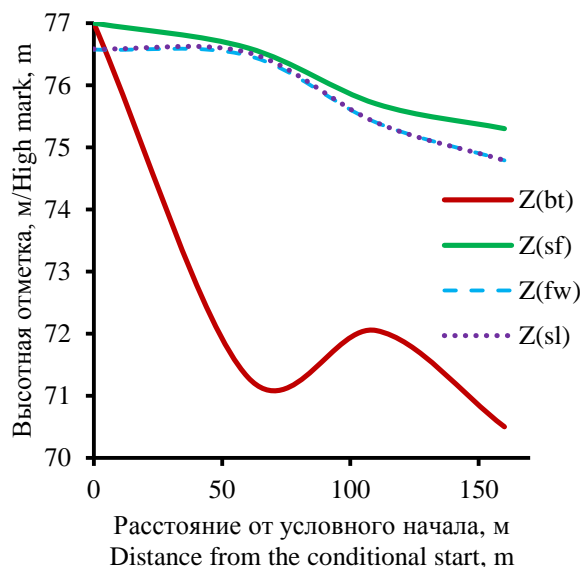


Рис. 4. Уточненный расчетный профиль участка Обского болота на границе с суходолом по состоянию на 18.03.2021 г.; Z(bt) – отметка дна болота; Z(sf) – отметка поверхности болота; Z(fw) – уровень болотных вод; Z(sl) – напорный уровень подземных вод

Fig. 4. Updated design profile of the Obskoe fen site on the border on 18.03.2021; Z(bt) is fen bottom mark; Z(sf) is fen surface mark; Z(fw) is fen water level; Z(sl) is groundwater pressure level

В то же время необходимо отметить потенциальный характер указанного выше взаимодействия болотных и подземных вод. Фактически влияние подземных вод ограничено нижней частью торфяной залежи

(рис. 2, а), что может объясняться характером изменения фильтрационных свойств торфов (рис. 5; фактическое изменение коэффициента фильтрации, предположительно, происходит с большей амплитудой), благодаря чему: 1) накопление хлоридов 18 марта 2021 г. приурочено к интервалу 3,50–4,25 м, сложенному низинным древесным переувлажненным торфом; 2) собственно расчет распространения индикаторных веществ по торфяной залежи можно ограничить участком торфяной залежи от ее поверхности до глубины 3 м, сформированным преимущественно низинным осоково-гипновым торфом; 3) в пределах этого участка адвективный перенос значим (с учетом уровней болотных вод у средней поверхности болота) в основном в

слое очеса, а основной механизм переноса загрязняющих веществ по торфяной залежи – диффузионный с учетом процессов сорбции и растворения – осаждения [42]; 4) участок торфяной залежи от 3,0 до 3,5 м, сложенный низинным осоковым торфом, можно рассматривать как локальный водоупор (примечание – только в расчетном профиле Обского болота, что не исключает более значительных фильтрационных свойств осокового торфа и отсутствие указанного водоупора на других участках Обского болота), в пределах которого преобладает взаимодействие «вода – органическое вещество – газ – минеральные включения» с практически отсутствием адвективного переноса и минимальным диффузионным переносом.

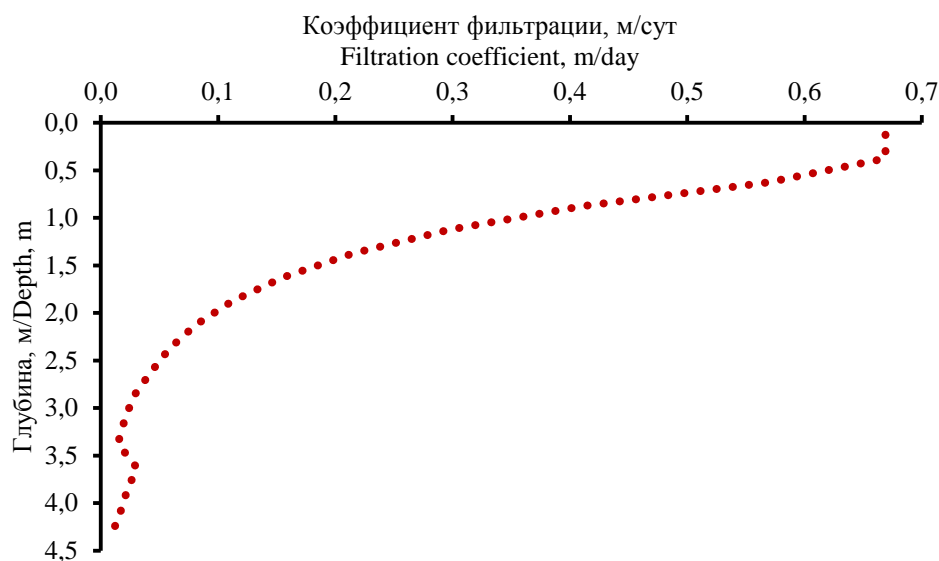


Рис. 5. Расчетное изменение коэффициента фильтрации торфов по глубине торфяной залежи Обского болота
Fig. 5. Calculated change in the peat filtration factor by the depth of the peat deposit of the Obskoe fen

С учетом указанных выше допущений и фактического распределения СИ в узловых точках (рис. 1, 2) для изучения распространения индикаторного вещества в водных вытяжках из торфов на исследуемом участке была использована одномерная стационарная модель диффузионного распространения вещества с концентрацией C в месяц t по торфяной залежи от поверхности до глубины $z=3,0$ м в виде (28) с частным аналитическим решением (29):

$$\frac{\partial^2 C_t}{\partial z^2} + \left(\frac{k_C}{D_m}\right) \cdot (C_{e,t} - C_t) = 0, \quad (28)$$

$$C_{z,t} = C_{e,t} + (C_{0,t} - C_{e,t}) \cdot \exp\left(-\frac{k_C}{D_m} \cdot z\right), \quad (29)$$

где k_C – удельная скорость изменения концентрации вещества C в месяц t на глубине z , сут⁻¹; D_m – коэффициент диффузии, м²/сут; $C_{0,t}$ – начальная концентрация в месяц t , переходящая из предыдущего месяца, оцениваемая по уравнению (30); $C_{e,t}$ – концентрация, соответствующая равновесию в системе «болотная вода – торф – газ – минеральные отложения» с учетом процессов сорбции–десорбции и растворения–осаждения в соответствии с уравнением (31); фактически эта величина ($C_{e,t}$) определена методом общего понижающего градиента по минимуму относительной ошибки (22):

$$C_{0,t} = \frac{dm_t}{dV_t} =$$

$$= \frac{m_{t-1} + C_{atm,t} \cdot \frac{D_m}{\Delta z} (C_{z1(0,125),t-1} - C_{0,t-1}) + C_{atm,t} \cdot X_{ef,t}}{V_{t-1} + X_{ef,t}}, \quad (30)$$

$$C_{e,t} = \frac{k_{pM} \cdot C_p + k_s \cdot S}{k_{pM} + k_s \cdot k_{CS} \cdot (S_m - S)}, \quad (31)$$

где dm_t и dV_t – изменение массы и объема вещества на поверхности болота в месяц t , начальная масса и объем в марте 2021 г. определены как сумма показателей содержаний СИ в исходном растворе NaCl и эффективных месячных атмосферных осадков; $C_{atm,t}$ – концентрация индикатора в месяце t (по наблюдениям в 2021 г. содержание СИ ориентировочно принято в талых снеговых водах 12,3 мг/дм³, в дождевых – 6,1 мг/дм³); Δz – интервал опробования (0,25 м); k_{pM} , k_s , k_{CS} – коэффициенты, характеризующие условия взаимодействия воды с торфом и минеральными отложениями; C_p – концентрация вещества в воде (водной вытяжке), соответствующая локальному равновесию; S и S_m – фактическая и максимально возможная концентрация вещества в грунте (кислотной вытяжке); более подробная информация о структуре и параметрах уравнения (31) приведена в [43].

Значение критерия (20) по вычисленным и измеренным поинтервальным содержаниям Cl^- в водных вытяжках их торфов составило 0,04, что может свидетельствовать об удовлетворительном описании конечного состояния торфяной залежи. При этом получена достаточно неожиданная картина распределения концентраций Cl^- по глубине торфяной залежи по ме-

сяцам. Так, резкое снижение содержаний отмечается уже в апреле. Однако в последующие месяцы при отсутствии дополнительного поступления раствора наблюдаются заметные колебания, связанные с «подтягиванием» наверх водной массы при увеличении дождевых осадков и «опусканием» вниз при преобладании испарения (рис. 6).

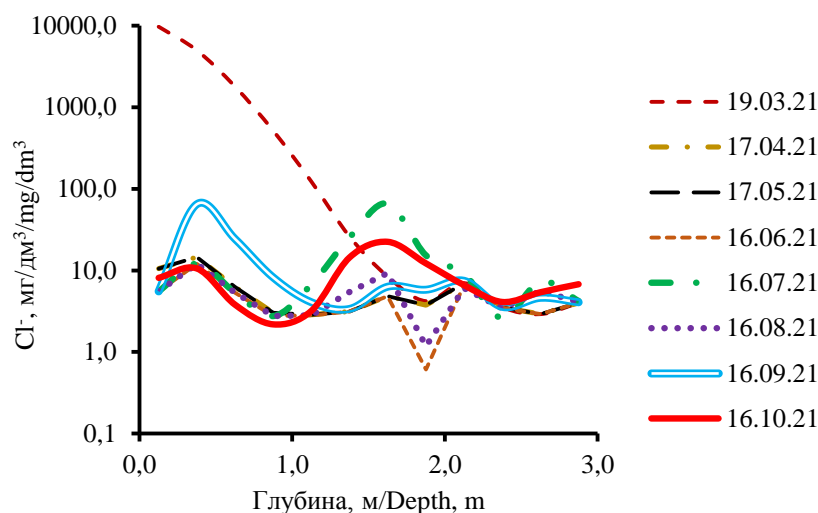


Рис. 6. Расчетные изменения концентраций Cl^- в водных вытяжках из торфов по глубине торфяной залежи в скважине НЗ с 19.03.2021 до 16.10.2021 г.

Fig. 6. Calculated changes in Cl^- concentration in water extracts from peat at the depth of the peat deposit in borehole НЗ from 19.03.2021 to 16.10.2021

Заключение

В результате выпуска 50 л раствора $NaCl$ с концентрацией 20 г/дм³ на поверхность евтрофного Обского болота 19 марта 2021 г. (дата выпуска индикаторного раствора; исходное распределение по торфяной залежи оценено 18 марта) по состоянию на 16 октября 2021 г. произошло формирование непосредственно в этом месте (скважина НЗ, рис. 1) относительно повышенных содержаний Cl^- в деятельном горизонте торфяной залежи и в интервале глубин 1,50–1,75 м. До выпуска раствора $NaCl$ выявлено наличие линзы болотных вод с повышенным содержанием Cl^- в интервале глубин 3,5–4,5 м [9]. Выполнены разработка и апробация математических моделей водного и геохимического режима участка торфяного болота, показавшие, что отмеченные факты связаны со следующими обстоятельствами: 1) болотные воды образуют общий поток с подземными водами в сторону реки Оби, но на границе болота возможны разнонаправленные перемещения болотных вод и периодические колебания напора подземных вод; 2) в нижней части торфяной залежи на исследуемом участке сформировался локальный водоупор в виде осокового слоя с относительно низкими фильтрационными свойствами (по сравнению с другими слоями), препятствующий распространению подземных вод с более высокой, чем у болотных, минерализацией, по всей глубине торфяной залежи; 3) этот же водоупор препятствует и распространению индикаторного раствора $NaCl$, поступившего на поверхность болота 18.03.2021 г.; 4) распределение индикатора (Cl^-) по торфяной залежи в значительной мере зависит не только от первоначальных объема и концентрации $NaCl$ и наличия водоупора, но и от характера увлажнения болота.

Указанные выводы получены на участке Обского болота у с. Нашеково, который является весьма типичным для заболоченных частей долин больших рек в таежной зоне Западной Сибири [1, 2]. По этой причине они могут быть распространены и на другие евтрофные болотные экосистемы и учтены при проведении экологического мониторинга. В частности, повышенные концентрации минеральных солей в водах и водных вытяжках низинных болот в ряде случаев могут быть связаны не с загрязнением, а с особенностями взаимосвязей болотных и подземных вод и водным режимом болота. Кроме того, перспективным природоохранным мероприятием для предотвращения загрязнения подземных вод на заболоченных территориях представляется организация локальных водоупоров в торфяной залежи путем уплотнения торфа и/или ввода глинистого раствора.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ БРИКС_Т № 18-55-80015.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение / О.Л. Лисс, Л.И. Абрамова, Н.А. Аветов, Н.А. Берзина, 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.
2. 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*. V. 190 / Eds. J.T.A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, D.F. Whigham. – Berlin: Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. – P. 315–341.
3. Global wetlands: potential distribution, wetland loss, and status / S. Hu, Zh. Niu, Y. Chen, L. Li, H. Zhang // *Science of the Total Environment*. – 2017. – V. 586. – P. 319–327. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.001.
4. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2020 г. / отв. ред. Г.М. Черногаева. – М.: Росгидромет, 2021. – 205 с. URL: <http://downloads.igce.ru/publications/reviews/review2020.pdf> (дата обращения 15.01.2022).
5. Охрана окружающей среды в территориальном Западно-Сибирском комплексе / В.А. Шишов, В.Ю. Шеметов, В.И. Рябченко, В.П. Парфенов. – М.: ВНИИОЭНГ, 1988. – 50 с.
6. Солнцева Н.П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. – М.: Изд-во МГУ, 1998. – 376 с.
7. 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.
8. Московченко Д.В., Бабушкин А.Г., Убайдулаев А.А. Солевое загрязнение поверхностных вод на нефтяных месторождениях Ханты-Мансийского автономного округа – Югры // *Водные ресурсы*. – 2017. – Т. 44. – № 1. – С. 91–102. DOI: 10.7868/S0321059617010102.
9. Эксперимент по оценке самоочищения Обского болота (Западная Сибирь, Томская область) / О.Г. Савичев, Н.В. Гусева, А.А. Хвашевская, А.Ю. Иванов, Ян Хэн, Чжоу Дань // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 1. – С. 73–84. DOI: 10.18799/24131830/2022/1/3514.
10. 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. – V. 193. – P. 131–145. DOI: 10.1007/s11258-006-9253-x.
11. Условия трансформации коммунально-бытовых сточных вод в болотных экосистемах (на примере Обского болота, Западная Сибирь) / И.С. Иванова, О.Г. Савичев, Е.А. Солдатова, 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.
12. 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. – V. 492. – P. 1. – P. 320–322. DOI: 10.1134/S1028334X20050219.
13. Савичев О.Г., Ян Хэн. Гидрогеологические и гидрологические условия функционирования Обского и Баксинского болот (юго-восток Западно-Сибирской равнины) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 4. – С. 43–56. DOI: 10.18799/24131830/2021/04/3147.
14. ГОСТ 17644-83. Торф. Методы отбора проб из залежи и обработки их для лабораторных испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 12 с.
15. Требования к производству и результатам многоцелевого геохимического картирования масштаба 1:200 000 / отв. ред. Э.К. Буренков. – М.: ИМГРЭ, 2002. – 92 с.
16. Weight W.D. Hydrogeology field manual. 2nd ed. – USA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. – 751 p.
17. Manual on stream gauging. V. I. Fieldwork. WMO. No. 1044. – Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2010. – 252 p.
18. Coldewey W.G., Gobel P. Hydrogeologische Gelände- und Kartiermethoden. – Berlin: Springer Spektrum, 2015. – 221 p. DOI: 10.1007/978-3-8274-2728-1.
19. Основы гидрогеологии. Гидрогеодинамика / И.К. Гавич, И.С. Зекцер, В.С. Ковалевский, Л.С. Язвин, Е.В. Пиннекер, С.С. Бондаренко, Л.В. Боровский, А.А. Дзюба / под ред. И.С. Зекцера. – Новосибирск: Наука, 1983. – 241 с.
20. 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.
21. Шестаков В.М. Гидрогеодинамика. – М.: КДУ, 2009. – 334 с.
22. Martin H., Pohl R. Technische Hydromechanik. Hydraulische und numerische Modelle. – Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2015. – 406 p.
23. Румынин В.Г. Теория и методы изучения загрязнения подземных вод. – СПб.: Наука, 2020. – 559 с.
24. Research progress on the migration and diffusion of pollutants at the sediment-water interface / Lei Pei, Zhang Hong, Wang Chao, Pan Ke // *Lake Science*. – 2018. – V. 30. – № 6. – P. 1489–1508.
25. A numerical study of the effect of wetland shape and inlet-outlet configuration on wetland performance / N. Sabokrouhiyeh, A. Bottacin-Busolinb, J. Savickis, H. Nepf, A. Marion // *Ecological Engineering*. – 2017. – V. 105. – P. 170–179. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2017.04.062.
26. ГОСТ 19179-73. Гидрология суши. Термины и определения. – М.: Госстандарт СССР, 1988. – 47 с.
27. Иванов К.Е. Водообмен в болотных ландшафтах. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 280 с.
28. Монин А.С. О математическом моделировании процессов гидрологии суши // *Теория и методы управления ресурсами вод суши*. – М.: Наука, 1982. – С. 20–28.
29. Дунин Ф.Х. Моделирование инфильтрации в приближении к полевым условиям // *Грани гидрологии* / под ред. Дж.К. Родда. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – С. 241–275.
30. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 15. Алтай и Западная Сибирь. Вып. 2. Средняя Обь. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 408 с.
31. Савичев О.Г. Гидроэкологическое обоснование водохозяйственных решений. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2021. – 167 с.
32. Мелиорация и водное хозяйство. В 5 т. Т. 3. Осушение / под ред. Б.С. Маслова. – М.: Агропромиздат, 1985. – 447 с.
33. Geochemical barriers in oligotrophic peat bog (Western Siberia) / O. Savichev, E. Soldatova, M. Rudmin, A. Mazurov // *Applied Geochemistry*. – 2020. – V. 113. – P. 104519. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.104519.
34. Альбом аэрофотоснимков растительного покрова торфяных месторождений центральной части Западной Сибири. – М.: Геолторфразведка, 1973. – 83 с.
35. Емельянова Т.Я., Крамаренко В.В. Характеристики фильтрационных свойств торфов Томской области // *Обской вестник*. – 2001. – № 1. – С. 36–39.
36. Лыготин В.А., Савичев О.Г., Макушин Ю.В. Многолетние изменения среднесезонных и среднегодовых уровней и температуры подземных вод верхней гидродинамической зоны в Томской области // *Геоэкология*. – 2010. – № 1. – С. 23–29.
37. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I. A discussion of principles // *Journal of Hydrology*. – 1970. – № 10 (3). – P. 282–290.
38. СП 33-101-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России, 2004. – 72 с.
39. Рекомендации по методике оценки и прогноза гидрогеологических условий при подтоплении городских территорий. – М.: Стройиздат, 1983. – 194 с.
40. Korn G.A., Korn Th.M. Mathematical handbook for scientists and engineers: definitions, theorems, and formulas for reference and review. Originally publ. – New York: Mc Graw-Hill, 1968. – Reprint in the US by Courier Corporation, 2013. – 1152 p.
41. Зельдович Я.Б., Мышкис А.Д. Элементы прикладной математики. – М.: Наука, 1972. – 592 с.

42. Лиштван И.И., Базин Е.Т., Косов В.И. Физические процессы в торфяных залежах. – Минск: Наука и техника, 1989. – 287 с.
43. Савичев О.Г., Чжоу Дань. Способ оценки допустимых концентраций загрязняющих веществ с учетом состояния донных отложений // Известия Томского политехнического универси-

тета. Инжиниринг георесурсов – 2021. – Т. 332. – № 6. – С. 107–117. DOI 10.18799/24131830/2021/06/3241.

Поступила 02.02.2022 г.

Информация об авторах

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

Ян Хэн, аспирант отделения геологии инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Чжоу Дань, аспирант отделения геологии инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 556.531.4:550.84.094

HYDROGEODYNAMIC AND HYDROGEOCHEMICAL CONDITIONS OF SELF-CLEARANCE OF THE OBSKOE FEN WATER (WESTERN SIBERIA)

Oleg G. Savichev¹,
OSavichev@mail.ru

Yang Heng¹,
13698754927@163.com

Zhou Dan¹,
929177582@qq.com

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance. Economic activity in the wetlands of Western Siberia in the conditions of climate change requires scientific justification of both methods of environmental monitoring and environmental protection measures. One of the effective ways of such justification, taking into account the lack of observations, is mathematical modeling of hydrogeodynamical and hydrogeochemical processes in fen ecosystems.

The aim of the research is to identify the mechanisms of natural-technogenic distribution of Cl⁻-concentrations in water extracts from peat over the depth of peat deposits.

Methods: field experiment, methods of definition of a chemical composition of peat and water, methods of mathematical modeling.

Results and conclusions. An experiment was conducted to study the self-purification of the eutrophic Obskoe fen in the south of the Tomsk region (release of 50 liters of NaCl solution with a concentration of 20 g/dm³ to the fen surface), and the nature of changes in Cl⁻-concentrations in peat deposits before and after the release of the solution was established. To explain the revealed facts, mathematical models of the water and geochemical regime of the peat fen site were developed and tested. As a result, it is shown that: 1) fen waters form a common flow with groundwater towards the Ob river; periodic fluctuations in groundwater pressure are possible at the border of the fen; 2) in the lower part of the peat deposit, a local water barrier has formed in the study area, preventing the spread of substances in a peat deposit; 3) distribution of the indicator (Cl⁻) over the peat deposit largely depends not only on the initial volume and concentration of NaCl and the presence of a water barrier, but also on the nature of the wetness of the fen. Recommendations on the use of simulation results are given.

Key words:

Mathematical modeling, chemical composition, peat deposit, fen waters, the Obskoe fen, Western Siberia.

The research was financially supported by the RFBR grant no. 18-55-80015.

REFERENCES

1. Liss O.L., Abramova L.I., Avetov N.A. *Bolotnye sistemy Zapadnoy Sibiri i ikh prirodookhrannoe znachenie* [Bog of Western Siberia and their conservation value]. Tula, Grif i K° Publ., 2001. 584 p.
2. Minayeva T., Bleuten W., Sirin A., Lapshina E.D. Eurasian mires of the Southern Taiga Belt: modern features and response to Holocene palaeoclimate. *Wetlands and Natural Resource Management. Ecological Studies*. Vol. 190. Eds. J.T.A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, D.F. Whigham. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2006. pp. 315–341.
3. 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.
4. *Obzor sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchey sredy v Rossiyskoy federatsii za 2020 g.* [Overview of the state and pollution of the environment in the Russian Federation for 2020]. Ed. ed. G.M. Chernogayeva. Moscow, Rosgidromet Publ., 2021. 205 p.
5. Shishov V.A., Shemetov V.Yu., Ryabchenko V.I., Parfenov V.P. *Okhrana okruzhayushchey sredy v territorialnom Zapadno-Sibirskom komplekse* [Environmental protection in the territorial West Siberian complex]. Moscow, VNIIOENG Publ., 1988. 50 p.
6. Solntseva N.P. *Dobycha nefii i geokhimiya prirodnykh landshaftov* [Oil mining and geochemical transformation of landscapes]. Moscow, Moscow State University Press, 1998. 376 p.
7. 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.
8. Moskovchenko D.V., Babushkin A.G., Ubaidulaev A.A. Solevoe zagryaznenie poverkhnostnykh vod na nefyanykh mestorozhdeniyakh Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga – Yugry [Salt pollution of surface waters at the oil fields of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra]. *Vodnye resursy*, 2017, vol. 44, no. 1, pp. 91–102. DOI: 10.7868/S0321059617010102.
9. Savichev O.G., Guseva N.V., Khvashchevskaya A.A., Ivanov A.Yu., Heng Y., Dan Zh. Experiment for estimating self-cleaning of the Obskoe fen (Western Siberia, Tomsk region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 1, pp. 73–84. DOI: 10.18799/24131830/2022/1/3514.
10. 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.
11. 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. DOI: 10.18799/24131830/2020/3/2530.
12. 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 Obskoe fen in anthropogenic conditions (the Western Siberia). *Doklady Earth Sciences*, 2020, vol. 492, P. 1, pp. 320–322. DOI: 10.1134/S1028334X20050219.

13. Savichev O.G., Yang Heng. Hydro-geological and hydrological conditions of functioning of the Obskoe and Baksinskoe fens (the southeast of the Western Siberian plain). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 4, pp. 43–56. DOI: 10.18799/24131830/2021/04/3147.
14. GOST 17644-83. *Torf. Metody otbora pro iz zalezhi i obrabotki ikh dlya laboratornykh ispytany* [SS 17644-83. Peat. Methods of sampling from deposit and preparation of samples for laboratory tests]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1983. 12 p.
15. *Trebovaniya k protivodstvu i rezul'tatam mnogotselevogo geokhimicheskogo kartirovaniya masshtaba 1:200000* [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.
16. Weight W.D. *Hydrogeology field manual*. 2nd ed. USA, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. 751 p.
17. *Manual on stream gauging*. Vol. I. *Fieldwork*. WMO. No. 1044. Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization, 2010. 252 p.
18. Coldewey W.G., Gobel P. *Hydrogeologische Gelände- und Kartiermethoden* [Hydrogeological terrain and mapping methods]. Berlin, Springer Spektrum, 2015. 221 p. DOI: 10.1007/978-3-8274-2728-1.
19. Gavich I.K., Zektser I.S., Kovalevsky V.S., Yazvin L.S., Pinneker E.V., Bondarenko S.S., Borevsky L.V., Dzyuba A.A. *Osnovy gidrogeologii. Gidroeodinamika* [Fundamentals of hydrogeology. Hydrogeodynamics]. Ed. by I.S. Zeccer. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983. 241 p.
20. 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.
21. Shestakov V.M. *Gidroeodinamika* [Hydrogeodynamics]. Moscow, KDU Publ., 2009. 334 p.
22. Martin H., Pohl R. *Technische Hydromechanik. Hydraulische und numerische Modelle* [Technical hydromechanics. Hydraulic and numerical models]. Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2015. 406 p.
23. Rumynin V.G. *Teoriya i metody izucheniya zagryazneniya podzemnykh vod* [Theory and methods of studying groundwater pollution]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2020. 559 p.
24. Lei Pei, Zhang Hong, Wang Chao, Pan Ke. Research progress on the migration and diffusion of pollutants at the sediment-water interface. *Lake Science*, 2018, vol. 30, no. 6, pp. 1489–1508.
25. Sabokrouhiyeh N., Bottacin-Busolinb A., Savickis J., Nepf H., Marion A. A numerical study of the effect of wetland shape and inlet-outlet configuration on wetland performance. *Ecological Engineering*, 2017, vol. 105, pp. 170–179. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2017.04.062.
26. GOST 19179-73. *Gidrologiya sushi. Terminy i opredeleniya* [Land hydrology. Terms and definitions]. Moscow, Gosstandart of the USSR Publ., 1988. 47 p.
27. Ivanov K.E. *Vodoobmen v bolotnykh landschaftakh* [Water exchange in mire landscapes]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975. 280 p.
28. Monin A.S. O matematicheskom modelirovani protsessov gidrologii sushi [On mathematical modeling of land hydrology processes]. *Teoriya i metody upravleniya resursami vod sushi* [Theory and Methods of Land Water Resource Management]. Moscow, Nauka Publ., 1982. pp. 20–28.
29. Dunin F.Kh. Modelirovanie infiltratsii v priblizhenii k polevym usloviyam [Modeling of infiltration in approximation to field conditions]. *Grani gidrologii* [Facets of hydrology]. Ed. by J.K. Rod-da. Translated from English. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1980. pp. 241–275.
30. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. T. 15. Altay i Zapadnaya Sibir. Vyp. 2. Srednyaya Ob* [Surface water resources of the USSR. Vol. 15. Altai and Western Siberia. Iss. 2. Middle Ob]. Ed. by O.N. Panin. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1972. 408 p.
31. Savichev O.G. *Gidroeologicheskoe obosnovanie vodokhozyaystvennykh resheniy* [Hydroecological substantiation of water management decisions]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. House, 2021. 167 p.
32. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo. T. 3. Osushenie* [Melioration and water management. Vol. 3. Drainage]. Ed. by B.S. Maslov. Moscow, Agropromizdat Publ., 1985. 447 p.
33. 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.
34. *Albom aerofotosnimkov rastitelnogo pokrova torfyanykh mestorozhdeniy tsentralnoy chasti Zapadnoy Sibiri* [Album of photographs of the vegetation cover of peat deposits in the central part of Western Siberia]. Moscow, Geol'torfrazvedka Publ., 1973. 83 p.
35. Emelyanova T.Ya., Kramarenko V.V. Kharakteristiki filtratsionnykh svoystv torfov Tomskoy oblasti [Characteristics of the filtration properties of peats of the Tomsk region]. *Obiskoy vestnik*, 2001, no. 1, pp. 36–39.
36. Lgotin V.A., Savichev O.G., Makushin Yu.V. Mnogoletnie izmeneniya srednesazonnykh i srednegodovykh urovnay i temperatura podzemnykh vod verkhney gidrodinamicheskoy zony v Tomskoy oblasti [Long-term changes in the average seasonal and average annual levels and temperature of groundwater in the upper hydrodynamic zone in the Tomsk region]. *Geoecology*, 2010, no. 1, pp. 23–29.
37. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, no. 10 (3), pp. 282–290.
38. SP 33-101-2003. *Svod pravil po proektirovaniyu i stroitelstvu. Opredelenie osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Code of rules for design and construction. Determination of the main calculated hydrological characteristics]. Moscow, Gosstroy of Russia Publ., 2004. 72 p.
39. *Rekomendatsii po metodike otsenki i prognoza gidrogeologicheskikh usloviy pri podtoplenii gorodskikh territoriy* [Recommendations on the methodology for assessing and forecasting hydrogeological conditions during flooding of urban areas]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1983. 194 p.
40. Korn G.A., Korn Th.M. *Mathematical handbook for scientists and engineers: definitions, theorems, and formulas for reference and review*. Originally publ. New York, Mc Graw-Hill, 1968. Reprint in the US by Courier Corporation, 2013. 1152 p.
41. Zeldovich Ya.B., Myshkis A.D. *Elementy prikladnoy matematiki* [Elements of applied mathematics]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 592 p.
42. Lishtvan I.I., Bazin E.T., Kosov V.I. *Fizicheskie protsessy v torfyanykh zalezakh* [Physical processes in peat deposits]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1989. 287 p.
43. Savichev O.G., Zhou Dan. Method for assessing allowable concentrations of polluting substances with conditions of river sediments. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 6, pp. 107–117. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2021/06/3241.

Received: 2 February 2022.

Information about the authors

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

Yang Heng, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Zhou Dan, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.